



22.04.2015

BEGLEITEN AUTOMATISCHER FENSTERLÜFTUNG IN SCHUL- BAUTEN

Projektnummer E3b.20

Schlussbericht

IMPRESSUM

Auftraggeberin:

Stadt Zürich,
Amt für Hochbauten,
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik,
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Bearbeitung:

Fachhochschule Nordwestschweiz
Institut Energie am Bau
St. Jakobs-Strasse 84
4132 Muttenz
Internet: www.fhnw.ch/iebau

Projektleitung:

Prof. Dr. Achim Geissler
Fachhochschule Nordwestschweiz
Institut Energie am Bau
St. Jakobs-Strasse 84
4132 Muttenz
Tel.: +41 61 467 45 45
E-Mail: achim.geissler@fhnw.ch

Projektteam:

Falk Dorsch (FHNW, Institut Energie am Bau, falk.dorsch@fhnw.ch)
Dr. Monika Hall (FHNW, Institut Energie am Bau, monika.hall@fhnw.ch)

Download als pdf von
www.stadt-zuerich.ch/egt

-> Projekte realisiert

Zürich, April 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	4
2	Module und Teilprojekte.....	6
2.1	Modul 1: Untersuchung und Beurteilung eines Betriebsjahres	6
2.2	Modul 2: Planungshandbuch für zukünftige Anlagen	28
3	Sicht des Auftraggebers	34
4	Anhang	36

1 Zusammenfassung

Durch eine automatische, in Abhängigkeit des Kohlendioxidgehalts (CO_2) der Raumluft geregelte Fensterlüftungsanlage kann die Raumluftqualität in Schulgebäuden verbessert werden.

Der vorliegende Schlussbericht fasst die Ergebnisse der Untersuchungen zur Effektivität einer automatisierten Fensterlüftung am Schulhauskomplex Ilgen A und B in Zürich-Hottingen zusammen.

Es wird gezeigt, welchen Einfluss die automatische Fensterlüftung auf die Raumluftqualität sowie den thermischen Komfort der Klassen- und Gruppenräume in den Schulhäusern A und B hat. Der zeitliche Fokus der Untersuchungen liegt dabei auf den Zeiträumen zwischen 20.08.2012 und 28.02.2013 sowie zwischen 17.06.2013 und 21.06.2013.

Raumluftqualität

Anhand der Daten zum CO_2 -Gehalt und zur Raumlufttemperatur wird die Raumluftqualität, die während der Unterrichtszeiten vorherrscht, für die Sommer-, Herbst- und Wintersaison separat bewertet. Es zeigt sich ein saisonal verschiedenes Bild:

- Während der Sommermonate erreicht die Raumluft in beiden Schulgebäuden in fast allen Räumen eine gute bis ausreichende Qualität.
- Mit Beginn der Heizperiode tritt eine Verschlechterung ein, die insbesondere in den Wintermonaten zu hohen CO_2 -gehalten in den Räumen der oberen Stockwerke beider Schulhäuser führt.
- Während der Wintersaison wird folgende Raumluftcharakteristik beobachtet:

Schulhaus A:

Der Raum mit der besten Raumluftqualität weist in mehr als 75% der Unterrichtszeit CO_2 -Gehalte unterhalb von 800 ppm auf. Ein Raum fällt durch eine hohe CO_2 -Belastung auf. In diesem Raum werden in 27% der Lektionen mehr als 1500 ppm CO_2 in der Raumluft gemessen. In den sieben weiteren Räumen werden vorwiegend CO_2 -Gehalte zwischen 800 und 1500 ppm gemessen.

Schulhaus B:

Ein Raum erreicht in mehr als 75% der Unterrichtszeit akzeptable CO_2 -Gehalte unterhalb von 800 ppm. Vier Räume sind stark belastet und weisen in 57 bis 68% der Lektionen mehr als 1500 ppm CO_2 in der Raumluft auf. In den 14 verbleibenden Räumen werden überwiegend CO_2 -Gehalte zwischen 800 und 1500 ppm beobachtet.

Analyse der Anlagenfunktion

Die Analyse der Messwerte der automatischen Fensterlüftungsanlage ergibt keinen Zusammenhang zwischen der Öffnungsweite der Fenster und dem CO_2 -Gehalt des jeweiligen Raumes. Ebenfalls ist den Messwerten kein Zusammenhang zwischen der Öffnungsdauer mit dem CO_2 -Gehalt zu entnehmen. Es ist derzeit ungeklärt, ob die Fensteröffnungsweite proportional zum CO_2 -Gehalt geregelt wird.

Optimierungspotential

Um die CO₂-Gehalte der hoch belasteten Räume während des Unterrichts auf Werte unterhalb der physiologisch bedenklichen Schwelle zu senken sind folgende Massnahmen denkbar:

- die Aktivierung des CO₂-proportionalen Lüftungsbetriebs,
- die Verlängerung der Stosslüftungsdauer am Morgen und in den Pausen,
- das Herabsetzen der CO₂-Schwellenkonzentration, ab der die Fenster geöffnet werden,
- ein genaues Anpassen der Öffnungsweiten an die Druck- und Anströmsituation (Luv/Lee),
- der Einbau von Überströmöffnungen in Räumen ohne Querlüftmöglichkeit,
- das Umplatzen von Sonnenschutzstoren.

Die Überwachung der Funktionsfähigkeit der Anlage ist derzeit sehr zeitaufwändig. Für einen schnellen Überblick über alle Räume ist es im Moment notwendig, die CO₂- und Temperaturverläufe aller Räume einzeln aufzurufen. Zur Vereinfachung der Funktionskontrolle würden sich folgende Instrumente anbieten:

- ein in der Steuersoftware programmiertes Übersichtstableau zur schnellen Erfassung der aktuellen Betriebssituation, der Raumluftqualitäten und der Raumlufttemperaturen,
- die Etablierung eines qualitativen Bewertungsindikators z.B. in Form einer Raumluftampel für CO₂ und Temperatur in den einzelnen Räumen.

Raumlufttemperatur

Die massive Konstruktion beider Schulgebäude führt zu einem guten thermischen Verhalten. Durch die grosse Trägheit reagiert die Temperatur im Gebäude nur sehr langsam auf Veränderungen der Umgebungstemperatur und auf sonstige Wärmeerträge. Die Raumlufttemperaturen bewegen sich im betrachteten Zeitraum in den Räumen beider Schulhäuser überwiegend im behaglichen Bereich.

Im August 2012 und Juni 2013 werden einige Hitzetage beobachtet, in deren Folge die Raumlufttemperaturen einiger Räume – besonders in den oberen Geschossen – kurzzeitig Werte von bis zu 30 °C erreichen.

Die Herbst- und Wintersaison 2012/2013 ist von einer milden Witterung geprägt. Im Herbst und Winter bewegen sich die Raumlufttemperaturen in beiden Schulgebäuden vorwiegend zwischen 20 und 22 °C. Vereinzelt werden in einigen Räumen Raumlufttemperaturen unterhalb von 20 °C gemessen. Raumlufttemperaturen kälter als 18 °C treten im Herbst und Winter zu keinem Zeitpunkt auf.

Die Beobachtungen im Frühjahr und der Sommer 2013 zeigen, dass die Nachtauskühlung am Gebäude zuverlässig funktioniert, solange sich die Aussenlufttemperaturen im moderaten Bereich bewegen. In Hitzeperioden mit hohen Aussenlufttemperaturen während der Nachtstunden ist keine Auskühlung mehr möglich,

Die massive Bauweise der Gebäude bedingt eine hohe thermische Trägheit mit gutem Hitzeverhalten. Generell liegt die Anzahl an Überhitzungsstunden unterhalb der Vorgabe gemäss SIA 382/1.

2 Module und Teilprojekte

2.1 Modul 1: Untersuchung und Beurteilung eines Betriebsjahres

Ausgangslage

Aktuelle Baustandards fordern zunehmend den Einbau von technisch aufwändig konstruierten mechanischen Lüftungssystemen. Automatisch gesteuerte Fensterlüftungen bieten eine attraktive technische Alternative zu komplexen Gebäudelüftungssystemen, die insbesondere bei der energetischen Sanierung historischer Schulbauten vermehrt eingesetzt werden. Durch die Nutzung von temperatur- und windabhängigen Druckunterschieden zwischen dem Gebäudeinneren und der Gebäudeumgebung kann so für einen effizienten Luftaustausch gesorgt werden [1]. Langjährige Untersuchungen zeigen, dass die Raumluftqualität in Schulräumen, vor allem in den Wintermonaten oft inakzeptabel ist. Besonders der Kohlendioxidgehalt (CO₂) der Raumluft erreicht Werte, bei denen Leistungsminderungen, Konzentrationsprobleme und Müdigkeit. Bei Schülern und Lehrern auftreten können [2]. Als einfaches Mittel zur Absenkung des Kohlendioxidgehalts bietet sich ein regelmäßiges Lüften der Klassenräume an.

Der Einbau einer mechanischen Lüftungsanlage ist bei Bestandsgebäuden mit historischer Bausubstanz oft nur mit grossem baulichem Aufwand möglich. Begrenzte Platzverhältnisse sowie die Vorgaben des Denkmalschutzes begrenzen den Spielraum der Lüftungsplaner und führen zu erhöhten Baukosten. Die automatische Fensterlüftung bietet sich daher als alternative Lösung für Gebäudesanierungen an.

Analog zu konventionellen mechanischen Lüftungsanlagen muss eine automatische Fensterlüftung an die Gegebenheiten des Gebäudes angepasst werden. Es ist nötig, einen Kompromiss aus minimalem Lüftungswärmeverlust und maximalen Luftaustausch zu finden, ohne jedoch direkten Einfluss auf den Aussenluftvolumenstrom nehmen zu können. Es ist erforderlich, die ideale Fensteröffnungsweite zu finden, bei der ein ausreichender Luftaustausch möglich ist und Faktoren, die zu Unbehaglichkeit führen (z.B. Zugluft, Temperaturgradienten, Kaltluftabfall) minimiert werden.

Neben der Einbruchsicherheit ist auch der Witterungsschutz (eindringender Niederschlag, Starkwind) zu berücksichtigen [3].

Im Sommer bietet die automatische Fensterlüftung zudem die Möglichkeit, das Gebäude während der Nacht abzukühlen, ohne dafür zusätzliche Betriebsenergie aufzuwenden.

Fragestellung

Der vorliegende Schlussbericht bezweckt, den Einsatz einer automatischen Fensterlüftung in den Gebäuden der Schaltanlage Ilgen zu bewerten. An beiden Schulhäusern soll demonstriert werden, dass automatische Fensterlüftungen für Schulgebäude geeignet sind und dass die Technik in den Routinebetrieb überführt werden kann. Es sollen mögliche Fehlerquellen und Störfaktoren ermittelt werden und Hinweise zur Optimierung der Betriebsführung gegeben werden. Die Basis bildet eine detaillierte Erfassung folgender Kenn- und Betriebsgrößen:

- Kohlendioxidgehalt,
- Raumlufttemperatur,
- Stellung der Fensteraktoren,
- Aussenklimabedingungen am Gebäudestandort.

Darauf aufbauend wird eine nach Jahreszeit differenzierte Auswertung durchgeführt. Die erfassten Daten werden hinsichtlich folgender Fragen ausgewertet:

- Kann eine gute Raumluftqualität erreicht werden?
- Werden behagliche Raumlufttemperaturen gewährleistet?
- Funktioniert die Anlage gemäss ihrer technischen Spezifikation?
- Welche Probleme treten auf, wo liegen die Ursachen dieser Probleme?
- Wie können die aufgetretenen Probleme gelöst werden?

Abgrenzung

In die Untersuchung und Analyse werden die Klassen-, Gruppen- und Funktionsräume in beiden Schulhäusern einbezogen. Auf die Betrachtung von Lager- und Nebenräumen ohne regelmässige Personenbelegung wird verzichtet. Die Turnhalle des Schulkomplexes wird nicht untersucht. Es wird nicht auf energetische Fragestellungen, wie Heizwärmeverbrauch und Lüftungsverlust, eingegangen.

Untersuchungsgegenstand und Vorgehen

Gebäude

Die Schulanlage Ilgen in Zürich Hottingen (Anhang 1, Lageplan und Schnitte) ist im klassizistischen Baustil errichtet und im Jahre 1877 (Schulhaus A) respektive 1889 (Schulhaus B) fertiggestellt. Die Schulanlage steht unter Denkmalschutz.

Die Bauten umfassen insgesamt 18 Klassenzimmer und Gruppenräume, drei Räume für Handarbeit, zwei Bibliotheksräume, drei Büros, zwei Lehrerzimmer, einen Mehrzweckraum, Räume für den Werkunterricht, Unterrichtsvorbereitung, für Musikübungen, für Sozialpädagogik sowie für therapeutische Aktivitäten.

Gemäss Baudokumentation [4] beträgt die Bruttogeschossfläche beider Schulhäuser 6'646 m². Die Energiebezugsfläche umfasst insgesamt 5'132 m².

Der Heizwärmebedarf (Q_h) beläuft sich auf 69 kWh/(m²*a) und wird über das Fernwärmenetz gedeckt. Die Schulhausanlage wurde im Jahr 2011/12 energetisch saniert, die Gebäude erfüllen damit die Anforderungen des Minergie-Standards. Auf dem Dach des Schulhauses B befindet sich eine Wetterstation.

Die Bedingungen in den Gebäuden sind für den Betrieb einer automatischen Fensterlüftung sehr gut, da die Räume mit einer Höhe von etwa 3.8 m ausreichend hoch dimensioniert sind, die Fenster mit Oberlichtern ausgestattet und in 22 der 41 Räume die Fenster so angeordnet sind, dass die Räume quer gelüftet werden können.

Automatische Fensterlüftung

Alle Schul-, Gruppen und Funktionsräume der Schulhäuser A und B wurden im Zuge der Renovation des Gebäudekomplexes im Jahre 2011/12 mit einer automatischen Fensterlüftung der Firma *WindowMaster* AG ausgerüstet. Die oberen Segmente der vertikal zweigeteilten Fenster sind mit Stellantrieben ausgestattet. Ein Zentralrechner übernimmt die Ansteuerung dieser Stellantriebe. In 41 Klassen-, Gruppen- und Büroräumen sind Sensoren zur Messung des CO₂-Gehalts sowie der Raumlufttemperatur installiert. Diese Sensoren leiten die erfassten Daten an den Zentralrechner weiter. Der Öffnungswinkel der Kippfenster wird abhängig vom CO₂-Gehalt der Raumluft und von der Raumlufttemperatur berechnet.

Im Regelschema [5] der automatischen Fensterlüftungsanlage sind folgende Werte und Parameter implementiert:

Liegt der CO₂-Gehalt eines Raums unterhalb von 800 ppm, bleiben die Fenster des Raums geschlossen. Steigt der CO₂-Gehalt über 800 ppm an, wird die Öffnungsweite der Fenster proportional zum CO₂-Gehalt angepasst. Erreicht der CO₂-Gehalt den Wert von 1500 ppm, sind die Fenster zu 8% der maximalen Öffnungsweite (entspricht einer Spaltbreite von etwa 2 cm) geöffnet. Bei CO₂-Gehalten oberhalb von 1500 ppm bleiben die Fenster mit 8% der maximalen Öffnungsweite geöffnet.

Um die Raumlufttemperatur am Tag (6:00 bis 22:00 Uhr) im Bereich über 20 °C zu halten, werden die Fenster geschlossen, sobald dieser Wert unterschritten wird. Im Sommer wird die natürliche Lüftung während der Nachtstunden (22:00 Uhr bis 6:00 Uhr) zum Kühlen des Gebäudes genutzt. Die minimal zulässige Raumlufttemperatur ist dabei auf 18 °C festgelegt.

Die Umschaltung von Sommer- auf Winterbetrieb erfolgt, sobald die mittlere Aussenlufttemperatur an zwei aufeinander folgenden Tagen unter 16 °C sinkt. Von Winter- auf Sommerbetrieb wird umgestellt, wenn es an zwei aufeinander folgenden Tagen im Tagesmittel wärmer als 16 °C ist. Die Umstellung erfolgt automatisch.

Im Tagesverlauf sind mehrere Zeitpunkte für die Stosslüftung definiert. Am Morgen (6:00 Uhr) werden alle Fenster bis zur maximalen Kippweite (100%) geöffnet, während der Unterrichtspausen ist die Öffnungsweite auf 50% begrenzt. Die Stosslüftungsintervalle haben eine Länge von 3 bis 5 Minuten.

Das Eindringen von Niederschlag durch geöffnete Fenster wird verhindert, indem die Fenster geschlossen werden, sobald die Wetterstation des Gebäudes Regen registriert.

In allen Räumen des Gebäudes ist es zudem möglich, die automatische Betätigung der Fenster per Handeingriff zu beeinflussen und die Oberlichter zu öffnen oder zu schliessen. Es ist auch möglich, die unteren Drehflügel Fenster konventionell per Hand zu öffnen.

Raumprogramm

Zur vereinfachten Zuordnung der CO₂-Gehalte und Raumlufttemperaturen werden im weiteren die Räume über ihre jeweilige Zonennummer bezeichnet. Die in Tabelle 1 grau hinterlegten Räume werden im Bericht nicht näher betrachtet, da es sich dabei nicht um primär für den Unterricht genutzte Räume handelt.

Tabelle 1: Lage, Raumnummer, -grundfläche, -volumen, -orientierung und Zonenzuordnung der Räume in den Schulhäusern A und B

Zone	Schulhaus	Geschoss	Raum-Nr.	Nutzung	Fläche	Volumen	Querlüftung möglich?	Fensterorientierung
1	A	EG	001	Grundstufe	98.8	374	ja	NO/SO/SW
2	A	EG	002	Jugendmusik	16.7	63	nein	SW
3	A	EG	003	Lager	16.2	62	nein	SW
4	A	EG	004	Mehrzweckraum	98.8	374	ja	SW/NW/NO
5	A	1.OG	101	Grundstufe	101.6	380	ja	NO/SO/SW
6	A	1.OG	102	Handarbeit	57.5	217	nein	SW
7	A	1.OG	103	Grundstufe	101.6	384	ja	SW/NW/NO
8	A	2.OG	201	Grundstufe	105.9	401	ja	NO/SO/SW
9	A	2.OG	202	Gruppenraum	59.5	227	nein	SW
10	A	2.OG	203	Grundstufe	106.3	403	ja	SW/NW/NO
11	A	DG	301	Sozialpädagogik	17.6	47	nein	NO/SO
12	A	DG	302	Therapie	25.9	63	nein	NO
13	A	DG	303	Teamzimmer	52.2	136	nein	NO
14	B	1.UG	UG 101	Bibliothek	61.8	173	ja	SO/NO
15	B	1.UG	UG 102	Bibliothek	23.7	65	ja	SO
16	B	1.UG	UG 103	Kleinklasse	62	168	ja	SW/SO
17	B	1.UG	UG 107	Werken	62.1	184	ja	NW/SW
18	B	1.UG	UG 108	Material Werken	13.3	40	nein	NW
19	B	EG	001	Klasse	67.6	256	ja	NO/SO
20	B	EG	002	Gruppenraum	26.8	101	nein	SO/SO
21	B	EG	003	Klasse	67.6	251	ja	SW/SO
22	B	EG	004	Büro Hausabwart	21.8	81	nein	SW
23	B	EG	005	Schulleitung	21.9	81	nein	SW/
24	B	EG	006	Klasse	67.4	249	ja	NW/SW
25	B	EG	007	Vorbereitung	27.4	103	nein	NW
26	B	EG	008	Teamzimmer	68	249	ja	NW/NO
27	B	1.OG	101	Klasse	69.1	260	ja	NO/SO
28	B	1.OG	102	Gruppenraum	27.3	105	nein	SO
29	B	1.OG	103	Klasse	69.3	262	ja	SW/SO
30	B	1.OG	104	Handarbeit	81.7	311	nein	SW
31	B	1.OG	105	Klasse	69.3	262	ja	NW/SW
32	B	1.OG	106	Gruppenraum	27.7	106	nein	NW
33	B	1.OG	107	Klasse	69.1	260	ja	NO/NW
34	B	2.OG	201	Klasse	71.8	271	ja	NO/SO
35	B	2.OG	202	Gruppenraum	27.5	106	nein	SO
36	B	2.OG	203	Klasse	71.8	271	ja	SW/SO
37	B	2.OG	204	Klasse	84.5	317	nein	SW
38	B	2.OG	205	Klasse	71.8	271	ja	NW/SW
39	B	2.OG	206	Gruppenraum	27.8	107	nein	NW
40	B	2.OG	207	Klasse	71.6	270	ja	NO/NW
41				Turnhalle				

Betrachtungsfokus

Der zeitliche Fokus der Untersuchungen erstreckt sich auf den Zeitraum zwischen 20.08.2012 und 28.06.2013. Um den Betrieb des automatischen Fensterlüftungssystems in Abhängigkeit von jahreszeitlich typischen Wettersituationen zu beschreiben, werden die Untersuchungen in die folgenden Zeiträume untergliedert.

„Sommer“ 20.08.2012 bis 29.09.2012 sowie 17.06.2013 bis 21.06.2013

Sommerperioden mit milden Aussentemperaturen und häufig geöffneten Fenstern sowie mit aktivierter Nachtauskühlung

„Herbst“ 01.10.2012 bis 01.12.2012:

Herbstperiode mit milden Tages- und kühlen Nachttemperaturen, Nachtauskühlung noch aktiviert.

„Winter“ 04.12.2012 bis 28.02.2013

Winterperiode mit kühlen Aussentemperaturen, die Nachtauskühlung des Gebäudes ist deaktiviert.

Die Winterperiode wird zusätzlich unterteilt, da am 25.01.2013 defekte CO₂-Sensoren ausgetauscht wurden und sich dadurch die Messwerte einiger Sensoren deutlich veränderten.

„Frühjahr“ 01.03.2013 bis 20.06.2013

Übergangsperiode mit kühlen bis milden Aussentemperaturen und häufig geöffneten Fenstern sowie mit teilweise aktivierter Nachtauskühlung.

Im Verlauf eines Tages werden die typischen Unterrichtszeiten (Montag bis Freitag jeweils 8:00 Uhr bis 17:00 Uhr) untersucht. Die Abend- und Nachtzeiten, Wochenenden sowie Schulferien sind nicht Gegenstand der Betrachtungen und werden für diesen Bericht nicht ausgewertet. Eine Ausnahme bildet der Zeitraum zwischen 17.06.2013 und 21.06.2013. In diesem Zeitraum wird die Wirksamkeit der Nachtauskühlung der Gebäude untersucht. Dafür werden die Messwerte zwischen 17:00 Uhr und 8:00 Uhr analysiert.

Messwerterfassung

In beiden Schulbauten und in der Turnhalle ist das Mess- und Steuerungssystem *Window-Master advanced NV* installiert [5]. Das System misst den CO₂-Gehalt der Raumluft und die Raumlufttemperatur als charakteristische Kenn- und Betriebsgrößen. Die CO₂-Gehalte werden als volumenproportionale Anteile (ppm) angegeben. Daraus werden die erforderlichen Regelgrößen (Öffnungsweite und -dauer) errechnet und die Fensteraktoren des Raumes angesteuert. Die Stellung der Fensteraktoren wird nach Werteänderung (*change of value COV*) aufgezeichnet, die Raumluft- und Aussentemperaturen, die CO₂-Gehalte und die Windrichtung werden in 15-Minuten-Schritten (*equivalent sample time*) aufgezeichnet.

In 16 Räumen sind Informationen zur Fensteröffnungsweite verfügbar. Diese Räume befinden sich vorwiegend im Schulhaus A (Zone 1 bis 14), zwei Räume (Zone 15 und 16) sind im Schulhaus B lokalisiert. Die Messdaten sind im 15-Minuten-Intervall aufgelöst. Die Daten liegen als csv-Dateien (*comma-delimited-values*) vor und sind chronologisch sortiert.

Plausibilitätsprüfung

Vor der Bewertung werden die erfassten Daten auf Plausibilität und Vollständigkeit gemäss folgender Kriterien geprüft:

- Liefern die Sensoren des jeweiligen Raumes Daten?
- Liegen die Minimalwerte des CO₂-Gehalts in den Zeiträume ohne Personenbelegung auf Aussenluftniveau (390–450 ppm)?
- Steigt der CO₂-Gehalt bei Personenbelegung an? Sinkt der Wert nach Ende der Unterrichtseinheiten ab? Reagiert die CO₂-Messung auf das Öffnen und Schliessen der Fenster?
- Treten „Sprünge“ in den Datenreihe auf?
- Sind die Datenreihen zeitlich konsistent und vollständig, treten chronologische oder strukturelle Datenlücken auf?
- Gibt es Auffälligkeiten (Sprünge, Drift) im Datensatz der Raumlufttemperaturen?
- Reagiert die Temperaturmessung auf das Öffnen und Schliessen der Fenster?

Bewertungsmethode Raumlufttemperatur

Als Leitgrösse für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit wird die Raumlufttemperatur genutzt. Die thermische Behaglichkeit wird durch eine Komfortbewertung gemäss SIA-Norm 382/1 [6] beschrieben. Dabei wird angenommen, dass das Komfortoptimum im Herbst und Winter bei Raumlufttemperaturen zwischen 20 °C und 22 °C und im Sommer zwischen 22 °C und 26,5 °C liegt. Die während einer Unterrichtslektion gemessenen Raumlufttemperaturen werden wie folgt in vier Kategorien eingeteilt:

Blaue Kategorie:	Raumlufttemperatur < 20 °C	(zu kalt)
Grüne Kategorie:	20 °C < Raumlufttemperatur < 22 °C	(angenehm [Winter])
Hellgrüne Kategorie:	22 °C < Raumlufttemperatur < 26.5 °C	(angenehm [Sommer])
Rote Kategorie:	Raumlufttemperatur > 26.5 °C	(zu warm)

Bewertungsmethode Raumluftqualität

Per Definition (SIA-Norm 382/1 [6]) werden Unterrichtsräume als mittel bis mässig belastet angesehen und in die Kategorien RAL 2 bis RAL 3 eingeordnet. Das generelle Ziel des Lüftens eines Raumes ist es, mindestens eine mässige Raumluftqualität (Kategorie RAL 3) zu

erreichen [8]. Durch diese Qualitätsanforderung soll erreicht werden, dass sich der CO₂-Gehalt eines Raumes stets unterhalb von 950 ppm respektive 1350 ppm bewegt. Basierend auf diesen Vorgaben werden die gemessenen Momentanwerte des CO₂-Gehalts eines Raumes wie folgt eingeordnet:

- Grüne Kategorie: CO₂-Gehalt < 800 ppm
- Hellgrüne Kategorie: 801 ppm < CO₂-Gehalt < 1350 ppm
- Gelbe Kategorie: 1351 ppm < CO₂-Gehalt < 1500 ppm
- Rote Kategorie: CO₂-Gehalt > 1500 ppm

Die raumweise und nach Saison differenzierte Bewertung erfolgt in Anlehnung an die Untersuchungen am Schulhaus Untermoos [7]. Die Exposition, d.h. die Zeitdauer, während der Personen erhöhten CO₂-Gehalten ausgesetzt sind, wird durch den Luftqualitätsindex LQ100 [6] beschrieben. Als Zielwert wird LQ100 = 75% festgelegt. Dies bedeutet, dass in 75% aller Unterrichtseinheiten der CO₂-Gehalt des jeweiligen Raums unter 800 ppm liegt. Daraus ergeben sich drei Bewertungskategorien:

- Gute Luftqualität: LQ100 >75%
- Ausreichende Luftqualität: 75 > LQ100 >50%:
- Inakzeptable Luftqualität: LQ100 <50%

Der Einfluss der Stosslüftung am Morgen und während der Unterrichtspausen wird durch Analyse des Temperaturverlaufes untersucht. Der Einfluss der Fensteröffnung zur Abkühlung des Gebäudes während der Nacht in der Sommersaison wird am Beispiel eines Zeitraums mit hohen Aussentemperaturen im Juni 2013 geprüft.

Analyse konstruktiver Gebäudedetails

Eine Analyse konstruktiver und funktioneller Gebäudedetails soll Schwachstellen am Gebäude aufzeigen. Dafür werden die Orientierung der Gebäude zueinander, die Fassadendetails sowie die Anordnung von An- und Einbauten an den Fenstern untersucht.

Resultate

Funktionalität

Die Plausibilitätsprüfung identifiziert sechs CO₂-Sensoren, welche absolut zu hohe Werte liefern. Die dabei gemessenen CO₂-Gehalte unterschreiten teilweise Werte von 1972 ppm nicht. Die Schwankungsbreite der Werte dieser Sensoren erscheint jedoch plausibel. Es wird angenommen, dass bei diesen Sensoren der Nullpunkt verschoben wurde. Folgende Sensoren sind betroffen:

- Haus A, Raum 001, EG Sensor B1P1Z1: CO₂-Messwert nicht unter 1973 ppm

Haus A, Raum 002, EG	Sensor B1P1Z2:	CO ₂ -Messwert nicht unter 1085 ppm
Haus A, Raum 101, 1.OG	Sensor B1P2Z5:	CO ₂ -Messwert nicht unter 1452 ppm
Haus A, Raum 203, 2.OG	Sensor B1P3Z10:	CO ₂ -Messwert nicht unter 1331 ppm
Haus A, Raum 303, DG	Sensor B1P4Z13:	CO ₂ -Messwert nicht unter 1496 ppm
Haus B, Raum 001, EG	Sensor B2P2Z19:	CO ₂ -Messwert nicht unter 1232 ppm

Die Kontrolle der gesamten Sensoren ergab, dass die Ursache der überhöhten Messwerte in der Verschmutzung der IR-Optik der Sensoren lag. Ein Austausch der Sensoren am 25.01.2013 führte nachfolgend zu plausiblen Messwerten. Die vor dem 25.01.2013 aufgezeichneten Daten werden nicht ausgewertet. Bei fünf CO₂-Sensoren (B2P1Z15, B2P1Z23, B2P1Z26, B2P1Z28 und B2P1Z33) geht der Minimalwert des CO₂-Gehalts vereinzelt auf 0 zurück [Anhänge 4 und 5], die Schwankungsbreite der Messwerte erscheint jedoch plausibel. Alle aufgezeichneten Werte dieser fünf Sensoren werden ohne weitere Korrekturen ausgewertet. Dies ist möglich, da die Medianwerte der CO₂-Gehalte (siehe Anhang 5) zwischen 360 ppm und 424 ppm liegen und sich die 25%-Perzentile zwischen 229 ppm und 312 ppm bewegen. Weiterhin liefert ein CO₂-Sensor (B1P4Z13) bis zum 14.08.2012 keine Messwerte. Ab dem 15.08.2012 misst dieser Sensor korrekt.

Die Daten der Sensoren B2P1Z15 (Bibliothek) und B2P1Z23 (Büro Schulleitung) werden nicht ausgewertet, da es sich dabei nicht um reguläre Unterrichtsräume handelt. Die Messdaten der Sensoren B2P1Z26, B2P1Z28 und B2P1Z33 werden ohne weitere Korrekturen ausgewertet, da die Medianwerte der CO₂-Gehalte (Anhänge 8 und 9) zwischen 360 ppm und 424 ppm liegen und sich die 25%-Perzentile zwischen 229 ppm und 312 ppm bewegen.

Der CO₂-Sensor B1P4Z41 (Turnhalle) lieferte bis zum 14.08.2012 keine Messwerte. Ab dem 15.08.2012 werden plausible Daten erfasst.

Klimatische Rahmenbedingungen

Das Mesoklima am Gebäudestandort (siehe Anhang 3) wird durch die Hauptwindrichtungen, die mittleren Windgeschwindigkeiten sowie durch den Aussenlufttemperaturverlauf charakterisiert. Die dafür genutzten Messdaten werden von der Wetterstation des Gebäudes geliefert. Tageszeitliche Unterschiede werden durch Tag-/ Nacht-Differenzierung (Tag: 8:00 Uhr bis 17:00 Uhr, Nacht: 17:00 Uhr bis 8:00 Uhr), saisonale Unterschiede durch Differenzierung in Frühlings-, Sommer-, Herbst- und Winterperiode herausgestellt.

Die Windexposition ist sowohl durch den lokalen Witterungseinfluss als auch durch die umgebende Topografie (Hanglage, Seenähe) geprägt. Windereignisse treten wesentlich häufiger in den Nachtstunden auf.

Während des Tages weht der Wind vorwiegend aus südlicher bis westlicher Richtung (aus Richtung des Zürichsees), Wind aus Nord bis Nordost wird am Tage ebenfalls beobachtet. Erwartungsgemäss ist der Herbst die windreichste Jahreszeit und der Sommer die windärmste. Am häufigsten werden Windgeschwindigkeiten zwischen 0.5 m/s und 3.0 m/s gemessen. Die Tag/Nacht-Unterschiede der Windgeschwindigkeiten sind gering. Windgeschwindigkeitsspitzen bis zu 7.0 m/s treten nur im Winter auf.

In der Nacht sind die Hauptwindrichtungen Nord bis Nordost vorherrschend und ist typisch für Berg- und Talwindssysteme mit Kaltluftabfall vom Berg. Während der Sommermonate ist

in der Nacht ebenfalls Wind aus Seerichtung zu beobachten. Die deutliche Fokussierung der Windrichtung während der Nachtstunden kann auf eine „Jetwirkung“ des Taleinschnitts des Wildbachtobels verursacht sein.

Der Untersuchungszeitraum beginnt mit einer Hitzeperiode mit Tagesmitteltemperaturen über 25 °C, die sich vom 20.08.2012 bis zum 25.08.2012 erstreckt. Der Temperaturverlauf sinkt erwartungsgemäss in den Herbst- und Wintermonaten.

Eine erste Kälteperiode trat zwischen 28.10.2012 und 31.10.2012 auf. Weitere Perioden mit Tagesmitteltemperaturen im Frostbereich traten zwischen dem 30.11.2012 und dem 14.12.2012, zwischen dem 14.01.2013 und dem 27.01.2013 sowie zwischen dem 09.02.2013 und dem 27.02.2013 auf.

Das Frühjahr beginnt im März und April mit einer eher kühlen Periode bei Aussenlufttemperaturen von maximal 10 °C. Ab Mitte Mai werden milde Temperaturen gemessen, zwischen 17.06.2013 und 21.06.2013 ist eine kurze Hitzeperiode zu beobachten.

Die Monatsmittelwerte liegen zum Teil deutlich über den langjährigen Durchschnittstemperaturen [8] (+2.1 °C im Dezember 2012). Lediglich der Monatsmittelwert im September 2012 entspricht den langjährigen Beobachtungen.

Raumluftqualität und Wochendynamik

Wie im Anhang 4 dargestellt, ist im **Schulhaus A** die Raumnutzung gut an der Wochendynamik des CO₂-Gehalts erkennbar. Es ist erkennbar dass die Räume vorwiegend im Zeitraum zwischen 8:00 Uhr und 12:00 Uhr und zwischen 13:00 Uhr und 16:00 Uhr genutzt werden. Die morgendliche Stosslüftung senkt den CO₂-Gehalt der Raumluft stark belasteter Räume unter 800 ppm ab. Dies ist beispielsweise am Morgen des 30.01.2012 in Klassenraum 203, 2.OG (Zone 10) gut zu erkennen. Zu Unterrichtsbeginn liegen die CO₂-Gehalte in allen betrachteten Räumen stets unter 800 ppm. Nach 8:00 Uhr steigen die CO₂-Gehalte rasch an und überschreiten den unteren Schwellenwert. In einzelnen, stärker genutzten Räumen, z.B. im Gruppenraum, 2.OG (Zone 9) wird der obere Schwellenwert in den späten Vormittagsstunden und bei intensiver Raumnutzung auch in den Nachmittagsstunden überschritten.

Weniger stark genutzte Räume, z.B. die Jugendmusikschule im EG (Zone 2) oder der für Handarbeitsunterricht genutzte Raum 102 im 1.OG (Zone 6) überschreiten den unteren Schwellenwert nur selten. Während der Nacht ist ein Absinken des CO₂-Gehalts unter den unteren Schwellenwert in allen Räumen des Schulhauses A zu beobachten. Auffällig ist der langsame Rückgang des CO₂-Gehalts in Zone 10. An allen Wochentagen ist eine in etwa ähnliche Tagesdynamik zu beobachten.

Im **Schulhaus B** (siehe Anhang 5) lässt sich die Raumnutzung weniger deutlich am CO₂-Gehalt der Raumluft ablesen. Zu Wochenbeginn liegen die CO₂-Gehalte aller Räume mit Ausnahme des Klassenraums 207 im 2.OG (Zone 40) unterhalb von 800 ppm. Bereits unmittelbar mit Unterrichtsbeginn (8:00 Uhr) am Montag überschreiten die CO₂-Gehalte der Klassen- und Gruppenräume den unteren Schwellenwert. Eine Absenkung der CO₂-Gehalte durch die morgendliche Stosslüftung ist in allen Räumen des Schulhauses B erkennbar. Allerdings reicht der dabei realisierte Luftwechsel oft nicht aus, um zum Unterrichtsbeginn in hoch belasteten Räumen den CO₂-Gehalt auf Werte unter 800 ppm abzusenken und damit eine gute Raumluftqualität sicherzustellen. Wie in der Tabelle 2 dargestellt, ist zu beobachten, dass die Zahl der Räume, in denen der CO₂-Gehalt um 8:00 Uhr über 800 ppm liegt, im Ver-

lauf einer Schulwoche von einem Raum am Montagmorgen auf 5 Räume an Freitagmorgen zunimmt. Der obere Schwellenwert (1'500 ppm) wird jedoch an keinem Morgen der betrachteten Woche überschritten.

Tabelle 2: Anzahl der Zonen mit Schwellenwertüberschreitungen zu Unterrichtsbeginn

	Anzahl Zonen mit Überschreitung des unteren Schwellenwerts	Anzahl Zonen mit Überschreitung des oberen Schwellenwerts
	> 800 ppm bis 1500 ppm	> 1500 ppm
Montag 8:00 Uhr	1	0
Dienstag 8:00 Uhr	4	0
Mittwoch 8:00 Uhr	4	0
Donnerstag 8:00 Uhr	6	0
Freitag 8:00 Uhr	5	0

Mit Intensivierung der Raumnutzung zwischen 12:00 Uhr und 15:00 Uhr überschreiten die CO₂-Gehalte der Zone 16, 19, 24, 19, 30, 31, 36, 38, 39 und 40 den oberen Schwellenwert. Auffällig ist hier besonders die hohe und lang anhaltende Belastung in den Räumen des 2.OG (Zone 38, 39 und 40).

Am Montagabend ist mit Ausnahme der Zonen 31, 32, 37, 38, 39 und 40 ein Rückgang des CO₂-Gehaltes auf Werte unterhalb 800 ppm zu beobachten.

Im Verlauf der Woche sinken die CO₂-Gehalte in den Abend weniger deutlich ab. Wie nachfolgend in Tabelle 3 aufgelistet, nimmt die Zahl der Zonen, in denen Überschreitungen des unteren und oberen Schwellenwerts am Ende eines Tages beobachtet werden, im Wochenverlauf zu.

Tabelle 3: Anzahl der Zonen mit Schwellenwertüberschreitungen um Mitternacht

	Anzahl Zonen mit Überschreitung des unteren Schwellenwerts	Anzahl Zonen mit Überschreitung des oberen Schwellenwerts
	> 800 ppm bis 1500 ppm	> 1500 ppm
Montag 24:00 Uhr	7	1
Dienstag 24:00 Uhr	7	3
Mittwoch 24:00 Uhr	11	1
Donnerstag 24:00 Uhr	9	2
Freitag 24:00 Uhr	13	13

Fensteraktoren

Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts nicht für jedem Raum in beiden Schulhäusern Daten zur Öffnungsweite der Fenster verfügbar waren, werden die Betrachtung zum Einfluss der Fensterlüftung auf die Raumluft auf die Schul- und Gruppenräume im Schulhaus A beschränkt. Die Grafiken der Anhänge 7 und 8 zeigen die Öffnungsweiten der Fenster der Räume im Erdgeschoss, im 1. und 2. OG sowie die assoziierten CO₂-Verläufe für den Zeitraum zwischen 28.01.2013 und 01.02.2013. Die Öffnungsweiten der Fenster sind als prozentuale Werte der maximalen Kippweite angegeben.

Die morgendliche Stosslüftung (6:00 Uhr) ist in allen Klassen- und Gruppenräumen deutlich erkennbar. Durch die intensive Zufuhr von Frischluft sinken die CO₂-Gehalte der Raumluft zu diesem Zeitpunkt auf dem Niveau der Aussenluft. Die Fenster der Klassen- und Gruppenräume werden zwischen 8:00 Uhr und 16:00 Uhr meist zu jeder vollen Stunde bis zu einer Öffnungsweite von 25% geöffnet. Dieser Öffnungs-Rhythmus erfolgt unabhängig vom CO₂-Gehalt des jeweiligen Raumes.

Mit Ausnahme des Mehrzweckraums im Erdgeschoss (Zone 4) sind in allen Klassen- und Gruppenräumen sporadisch Öffnungsweiten bis zu 50% zu beobachten. Dabei ist weder ein zeitlicher Rhythmus noch ein systematischer Zusammenhang zum CO₂-Gehalt der Raumluft erkennbar. Es ist möglich, dass diese Fensteröffnungen durch eine manuelle Betätigung ausgelöst wurden. Nach 16:00 Uhr bleiben alle Fenster –unabhängig vom CO₂-Gehalt der Raumluft- geschlossen. So ist am 28.01.2012 zwischen 19:45 Uhr und 21:30 Uhr im Mehrzweckraum im Erdgeschoss (Zone 4) ein starker Anstieg des CO₂-Gehaltes zu beobachten ohne dass die Fenster geöffnet werden. Die Ursache des steigenden CO₂-Gehaltes ist derzeit nicht erklärbar. Während der Nachtstunden sinken die CO₂-Gehalte kontinuierlich ab. Obwohl keine Frischluft durch geöffnete Fenster in die Räume gelangt, findet ein Luftaustausch innerhalb des Gebäudes statt.

Die Klassenräume im Schulhaus A bieten –mit Ausnahme des Gruppenraums 202 (2. OG, Zone 9) und des Raumes für Handarbeiten 102 (1. OG, Zone 6) die Möglichkeit zur Querlüf-

tung. Ein schnelleres Absinken des CO₂-Gehaltes ist in Räumen mit Querlüftmöglichkeit gegenüber Räumen ohne Querlüftmöglichkeit jedoch nicht zu erkennen.

In Räumen mit hoher Belastung (Zone 1, 5, 7, 9 und 10) ist nicht zu beobachten, dass die Fenster länger und häufiger geöffnet werden als in Räumen mit geringerer Belastung.

Aus den vorliegenden Daten ist nicht erkennbar, dass die Öffnungsweite der Fenster proportional zum CO₂-Gehalt verändert wird. Auch kann in keinem der betrachteten Räume festgestellt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Dauer der Fensteröffnung und dem CO₂-Gehalt der Raumluft besteht.

Qualitative Bewertung der Raumluft

Die Tabelle 4 gibt einen Überblick über die im gesamten Untersuchungszeitraum vorherrschenden Raumluftqualitäten. Die Tabelle ist gemäss dem vorgängig erwähnten Bewertungsschema farblich hinterlegt.

Tabelle 4: Raum- geschoss- und gebäudespezifische Auflistung der Raumluftqualität

Zone	Schulhaus	Geschoss	Raum-Nr.	Nutzung	Fläche	Volumen	Querlüftung möglich?	Fensterorientierung
1	A	EG	001	Grundstufe	98.8	374	ja	NO/SO/SW
2	A	EG	002	Jugendmusik	16.7	63	nein	SW
3	A	EG	003	Lager	16.2	62	nein	SW
4	A	EG	004	Mehrzweckraum	98.8	374	ja	SW/NW/NO
5	A	1.OG	101	Grundstufe	101.6	380	ja	NO/SO/SW
6	A	1.OG	102	Handarbeit	57.5	217	nein	SW
7	A	1.OG	103	Grundstufe	101.6	384	ja	SW/NW/NO
8	A	2.OG	201	Grundstufe	105.9	401	ja	NO/SO/SW
9	A	2.OG	202	Gruppenraum	59.5	227	nein	SW
10	A	2.OG	203	Grundstufe	106.3	403	ja	SW/NW/NO
11	A	DG	301	Sozialpädagogik	17.6	47	nein	NO/SO
12	A	DG	302	Therapie	25.9	63	nein	NO
13	A	DG	303	Teamzimmer	52.2	136	nein	NO
14	B	1.UG	UG 101	Bibliothek	61.8	173	ja	SO/NO
15	B	1.UG	UG 102	Bibliothek	23.7	65	ja	SO
16	B	1.UG	UG 103	Kleinklasse	62	168	ja	SW/SO
17	B	1.UG	UG 107	Werken	62.1	184	ja	NW/SW
18	B	1.UG	UG 108	Material Werken	13.3	40	nein	NW
19	B	EG	001	Klasse	67.6	256	ja	NO/SO
20	B	EG	002	Gruppenraum	26.8	101	nein	SO/SO
21	B	EG	003	Klasse	67.6	251	ja	SW/SO
22	B	EG	004	Büro Hausabwart	21.8	81	nein	SW
23	B	EG	005	Schulleitung	21.9	81	nein	SW
24	B	EG	006	Klasse	67.4	249	ja	NW/SW
25	B	EG	007	Vorbereitung	27.4	103	nein	NW
26	B	EG	008	Teamzimmer	68	249	ja	NW/NO
27	B	1.OG	101	Klasse	69.1	260	ja	NO/SO
28	B	1.OG	102	Gruppenraum	27.3	105	nein	SO
29	B	1.OG	103	Klasse	69.3	262	ja	SW/SO
30	B	1.OG	104	Handarbeit	81.7	311	nein	SW
31	B	1.OG	105	Klasse	69.3	262	ja	NW/SW
32	B	1.OG	106	Gruppenraum	27.7	106	nein	NW
33	B	1.OG	107	Klasse	69.1	260	ja	NO/NW
34	B	2.OG	201	Klasse	71.8	271	ja	NO/SO
35	B	2.OG	202	Gruppenraum	27.5	106	nein	SO
36	B	2.OG	203	Klasse	71.8	271	ja	SW/SO
37	B	2.OG	204	Klasse	84.5	317	nein	SW
38	B	2.OG	205	Klasse	71.8	271	ja	NW/SW
39	B	2.OG	206	Gruppenraum	27.8	107	nein	NW
40	B	2.OG	207	Klasse	71.6	270	ja	NO/NW
41				Turnhalle				

Farbcodierung:

Rot	Inakzeptable Luftqualität
Gelb	Ausreichende Luftqualität
Grün	Gute Luftqualität

Grau hinterlegte Räume werden nicht bewertet, gelb hinterlegte Räume kennzeichnen die Räume mit ausreichender, grünmarkierte Räume mit guter Raumluftqualität. In den Anhängen 8 und 9 werden die bewerteten Raumluftqualitäten –differenziert nach Saison und Gebäude– detailliert grafisch aufgeschlüsselt. Die Anhänge 8 und 9 geben einen Überblick über die gemessenen Minimal-, Median- und Maximalwerte der CO₂-Gehalte.

Während der Sommerperiode erreichen alle Schul- und Gruppenräume einen LQ100 > 75%. Die Medianwerte der CO₂-Gehalte bewegen sich im Bereich zwischen 429 ppm bis 596 ppm, die maximalen CO₂-Werte steigen auf bis zu 1'658 ppm.

Das Diagramm in Anhang 10 zeigt, dass im Schulhaus A mit Beginn der Heizsaison am 01.10.2012 der LQ100 erkennbar absinkt. Die Medianwerte der CO₂-Gehalte steigen auf 439 ppm bis 682 ppm an, die maximalen CO₂-Werte erreichen 2'381 ppm. Ab 01.12.2012 erreicht lediglich ein Raum den Zielwert der Raumluftqualität von 75%. Nach Austausch der defekten CO₂-Sensoren am 25.01.2013 kann die RLQ aller Schul- und Gruppenräume bewertet werden. Ab 25.01.2013 erreicht die RLQ im Schulhaus A in den Zonen 2, 4 und 6 den Zielwert, während die RLQ in allen anderen Räumen des Gebäudes mit LQ100 < 50% inakzeptabel ausfällt. Die Medianwerte steigen wiederum auf 466 ppm bis 1'246 ppm an, es werden Maximalwerte von bis zu 2'810 ppm beobachtet.

Die Diagramme im Anhang 11 zeigen, dass im Schulhaus B während der Sommerperiode 15. von 19 Zonen eine gute RLQ (LQ100 > 75%) sowie zwei Zonen eine ausreichende RLQ (50% < LQ100 < 75%) aufweisen. Die Medianwerte der CO₂-Gehalte bewegen sich im Bereich zwischen 380 ppm bis 837 ppm, die maximalen CO₂-Werte steigen auf bis zu 2'591 ppm. Eine Zone im Gebäude wird nicht bewertet. Vergleichbar zu den Beobachtungen im Schulhaus A sinkt der Luftqualitätsindex mit Beginn der Heizperiode ab. Während im Herbst sieben Zonen eine gute und 11 Zonen eine ausreichende RLQ aufweisen, nimmt der Anteil der Zeiträume mit inakzeptabler Luftqualität besonders in den Räumen des 2.OG zu. Analog dazu steigen die Medianwerte der CO₂-Gehalte auf 384 ppm bis 1'197 ppm an. Im Maximum wird ein CO₂-Gehalt von 3'074 ppm gemessen.

Nach dem 25.01.2013 weist lediglich eine Zone im Gebäude B eine gute Luftqualität auf, während in 5 Zonen eine ausreichende RLQ und 13 Zonen eine inakzeptable RLQ vorherrscht. Es ist erkennbar, dass während der Winterperiode besonders in den Räumen des 2.OG keine ausreichende RLQ gewährleistet werden kann. Deutlich wird dies an hohen Medianwerten von 316 ppm bis 1'773 ppm und dem bisher höchsten in allen Räumen beobachteten CO₂-Gehalt von 4'384 ppm.

Bewertung der Raumlufttemperaturen

Die zeitliche Verteilung der Raumlufttemperaturen während der Sommer-, Herbst- und Wintersaison werden in Anhang 12 (Schulhaus A) und in Anhang 13 (Schulhaus B) dargestellt. Im Schulhaus A werden während der Sommerperiode überwiegend (in 70% bis 92% aller Stunden) angenehme Raumlufttemperaturen gemessen. Zu hohe Temperaturen werden in 2% bis 11% aller Stunden beobachtet. Eine Ausnahme bilden die Zonen 2 und 4 im Erdgeschoss, deren Raumlufttemperaturen stets unter 26.5 °C liegen. Zu tiefe Raumlufttemperaturen werden vorwiegend in den Erdgeschossräumen (Zone 1 bis 4, 11% bis 30% der Stunden) beobachtet. Im 1. und 2.OG treten nur wenige (3% bis 5%) Zeiträume mit Temperaturen unter 20 °C auf. Raumlufttemperaturen unter 18 °C werden im Sommer zu keinem Zeitpunkt gemessen. Die maximale Raumlufttemperatur beträgt 30.2 °C und wurde am 20.06.2013 um 16:00 Uhr in Zone 9 beobachtet.

Während des Herbstes und Winters bewegen sich die Raumlufttemperaturen überwiegend im behaglichen Bereich. Im Herbst bildet die Zone 2 eine Ausnahme, deren Raumlufttemperaturen in 46% der Stunden unterhalb von 20 °C liegen. Im Winter wird die Behaglichkeitsschwelle von 20 °C in den Zonen 1, 2 und 5 in 20% bis 25% der Stunden unterschritten. Die Raumlufttemperaturen unterschreiten jedoch den Wert 18 °C im Herbst und Winter zu keinem Zeitpunkt.

Die Raumlufttemperaturen im Schulhaus B sind mit denen im Haus A vergleichbar. Im Sommer bewegen sie sich überwiegend im behaglichen Bereich. Überschreitungen sind in allen Räumen des 2.OG (5% bis 14% aller Stunden) und in 4 Zonen des 1.OG (5% bis 13%) zu beobachten. Die maximale Raumlufttemperatur beträgt 32.1 °C und trat am 19.06.2013 um 15:30 Uhr in Zone 38 auf. Raumlufttemperaturen unter 20 °C werden im Sommer nur kurzzeitig in der Zone 27 gemessen. Während im Herbst nur selten Unterschreitungen der Behaglichkeitsschwelle auftreten, sind im Winter (meist in den Morgenstunden) Raumlufttemperaturen von unter 20 °C in sieben Zonen des Gebäudes zu beobachten. Raumlufttemperaturen unter 18 °C werden mit Ausnahme der Zone 39 in keinem der betrachteten Räume gemessen. Auffällig ist das Temperaturverhalten des Raumes 206 im 2.OG (Zone 39). Die Raumlufttemperatur dieses Raumes liegt im Herbst und Winter überwiegend unter 20 °C Die gemessene Minimaltemperatur liegt bei 14 °C. Die Ursache hierfür ist im Moment unklar. Es bleibt zu klären, ob der Raum nur wenig beheizt wird, ob der Lüftungswärmeverlust durch häufiges Öffnen der Fenster als Folge des überdurchschnittlich hohen CO₂-Gehalts zu tiefen Raumlufttemperaturen führt, oder ob ein Defekt am Temperatursensor vorliegt.

Wie bereits erwähnt, waren im Schulhaus A einige Räume mit fehlerhaft messenden CO₂-Sensoren ausgestattet. Als Folge waren die Fenster dieser Räume übermäßig lange und besonders häufig geöffnet. Dies führt besonders im Schulhaus A zu erhöhten Lüftungswärmeverlusten und ist besonders gut an den häufig kühlen Raumlufttemperaturen in Zone 2 zu erkennen. Nach erfolgtem Sensoraustausch steigen die Raumlufttemperaturen der betroffenen Zonen um 2 bis 3 K an.

Bei der Vor-Ort-Begehung berichtete der Hauswart von niedrigen Raumtemperaturen in einigen Klassenräumen. Eine Abklärung ergab, dass sich das System bis Ende November 2012 noch im Sommerbetrieb befand, obwohl zu diesem Zeitpunkt während der Nachtstunden bereits Aussentemperaturen von unter 10 °C gemessen wurden. Somit werden die Fenster während der Nacht zur Kühlung der Gebäude geöffnet, was zu erhöhten Lüftungswärmeverlusten führt.

Die Raumlufttemperaturen in beiden Schulhäusern bewegen sich im Frühjahr 2013 zum Grossteil aller Unterrichtsstunden im behaglichen Bereich. Der wärmste Raum im Schulhaus A liegt im 2.OG des Gebäudes (Zone 10, Raum 203, Grundstufe) und weist in 6% der Unterrichtsstunden Raumlufttemperaturen über 26.5 °C auf. Im Schulhaus B befindet sich der wärmste Raum ebenfalls im 2. OG (Zone 36, Raum 203, Klassenzimmer). In diesem Raum werden in 7% der Unterrichtsstunden Raumlufttemperaturen oberhalb von 26.5 °C gemessen. Der Raum 207, 2 OG im Schulhauses B (Zone 40), fällt durch besonders tiefe Raumlufttemperaturen auf. In diesem Raum werden in 25% der Unterrichtsstunden Raumlufttemperaturen unter 20 °C gemessen. Die Minimaltemperatur dieses Raumes liegt bei 13 °C.

Eine raumweise Aufstellung der Überhitzungsstunden wird in Abbildung 1 gezeigt. Die Zahl der Überhitzungsstunden bewegt sich zwischen 0 h und 41 h im Schulhaus A und zwischen 0 h und 45 h im Schulhaus B. Die höchste Zahl an Überhitzungsstunden (45 h) wird im Raum 204, 2.OGSchulhaus B (Zone 37) gemessen.

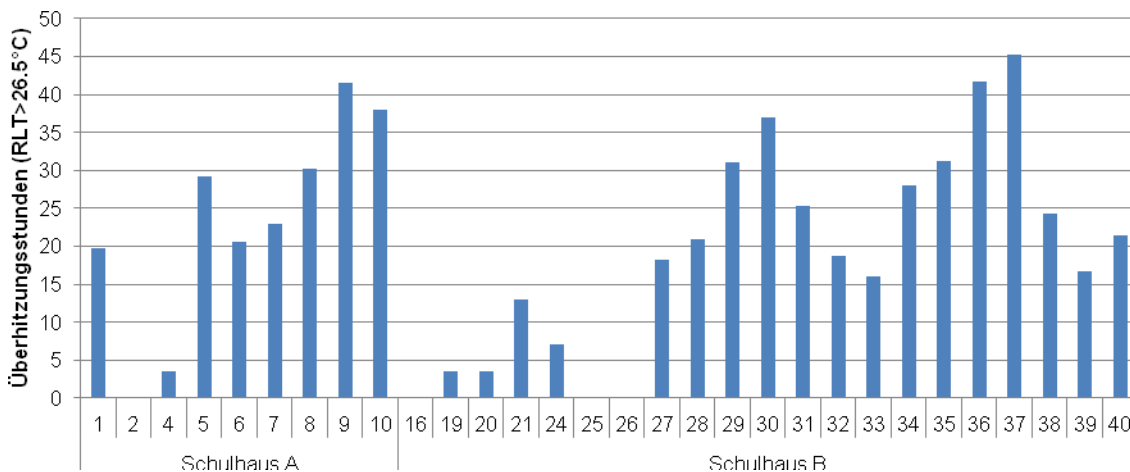


Abbildung 1: Raum- und gebäudeweise Aufstellung der Überhitzungsstunden im Frühjahr 2013

Einfluss der Stosslüftung und Nachtauskühlung

Im Winter ist der kurze morgendliche „Frischlufstoss“ nicht im Raumlufttemperaturverlauf erkennbar. Er führt nur zu einer geringfügigen ($<0.3\text{ K}$) Absenkung der Raumlufttemperaturen. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch diese Massnahme keine zusätzlichen Lüftungswärmeverluste hervorgerufen werden.

Die Wirksamkeit der Nachtauskühlung des Gebäudes durch dauerhaft geöffnete Fenster wird durch eine Analyse der Raumlufttemperaturverläufe geprüft. Dafür wird die Hitzeperiode zwischen 17.06.2013 und 21.06.2013 mit Aussenlufttemperaturen bis zu 33 °C gewählt. Während dieser fünf Tage fallen die Minimalen Aussenlufttemperaturen in der Nacht nicht unter 22 °C . Es zeigt sich, dass sich in beiden Gebäuden bereits am Montagnachmittag 15 Räume im 1. und 2. OG auf über 26.5 C erwärmt haben. In der Nacht zum Dienstag fallen die Raumlufttemperaturen in einigen Räumen wieder unter 26.5 °C . Am Dienstagmittag kommt es zu einer wiederholten Überhitzung, die bis auf wenige Räume bis zum Freitagmorgen anhält. Die EG-Räume in beiden Gebäuden reagieren ebenfalls auf den solaren Wärmeeintrag, allerdings sind in der betrachteten Woche weniger Überhitzungsstunden und eine deutlicheres Absinken der Raumlufttemperaturen in der Nacht zu beobachten.

Ab Donnerstagabend sinkt die Aussenlufttemperatur wieder unter 20 °C , als Folge ist ein rasches Absinken der Raumlufttemperaturen auf Werte zwischen 20 C und 26.5 °C zu beobachten.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Aktivierung der Nachtauskühlung bei milden Aussenlufttemperaturen effektiv dafür sorgt, dass die am Vortag aufgenommene Wärme während der Nachtstunden an die Umgebung abgegeben wird. Die Steuerung der Fensteraktuatoren sorgt dafür, dass bei Raumlufttemperaturen über 23 °C die Oberlichter bis zur maximalen Öffnungsweite angeklappt werden.

Treten jedoch länger anhaltenden Hitzeperioden mit hohen Aussenlufttemperaturen am Tag und in der Nacht ein, nimmt die Möglichkeit, die Gebäude nachts abzukühlen, ab. Am Beispiel der Hitzeperiode zwischen 17.06.2013 und 21.06.2013 ist erkennbar (im Anhang 16 exemplarisch für den Raum 001, EG, Schulhaus A dargestellt), dass die Raumlufttemperatur während der Nacht bei geöffneten Fenstern zwar sinkt, jedoch nicht den Wert der Aussenlufttemperatur erreicht. Trotz der grossen thermischen Trägheit des Gebäudes ist ein Ansteigen der minimalen Raumlufttemperatur zu beobachten. Nach drei Hitzetagen in Folge, sinkt die minimale Temperatur in diesem Raum auf lediglich 26.2 °C ab obwohl zeitgleich eine Aussenlufttemperatur von 22.5 °C gemessen wird. §x

Empfehlungen und Diskussion

Vorteile der automatischen Fensterlüftung

Bisherige Untersuchungen z.B. [2, 7] zeigten, dass die Luftqualität in Klassenzimmern nur dann durch Handlüftung gewährleistet werden kann, wenn dem Raum eine Lehrperson fest zugeordnet wird und diese die erforderliche Disziplin beim Lüften aufbringt. Unsere Untersuchungen ergeben, dass der „menschliche“ Einfluss durch Automatisierung optimal ergänzt und mit der am Schulkomplex Ilgen installierten automatischen Fensterlüftungsanlage eine gute bis ausreichende Raumluftqualität erreicht werden kann.

Zusätzlich zu den im SIA-Merkblatt 2023 [8] definierten Vorteilen zeigt die automatische Fensterlüftung mit manueller Eingriffsmöglichkeit gegenüber der konventionellen mechanischen Lüftung bei Altbausanierungen die folgenden Eignungskriterien:

Es wird kein zusätzlicher Platz für den Einbau von Luftleitungen und für eine Lüftungszentrale benötigt.

Die Innenraumgestaltung des Gebäudes wird nicht durch Steigzonen und Lüftungskanäle gestört.

Die Stellmotoren zur Betätigung der Fenster können so in den Fensterrahmen integriert werden, dass sie optisch nicht in Erscheinung treten.

Das subjektive Empfinden der Raumnutzer wird verbessert, indem durch das Einströmen frischer Aussenluft der Kontakt zur Umwelt bestehen bleibt.

Die Keimübertragung durch verschmutzte Luftleitungen wird ausgeschlossen.

Automatische Fensterlüftungsanlagen benötigen wenig Aufwand zum Reinigen und Einstellen von Rohrleitungen, Klappen, Volumenstromreglern. Regelmässige Filterwechsel sind nicht erforderlich. Betriebsenergie zur Luftförderung ist nicht erforderlich.

Es besteht die Möglichkeit, die Anlage zur Nachtauskühlung des Gebäudes zu nutzen. Bei Belastungsspitzen kann zudem eine Stosslüftung durch kurzzeitiges manuelles Öffnen durchgeführt werden.

Probleme bei der Brandabschnittsbildung, wie sie bei zentral platzierten mechanischen Lüftungsanlagen auftreten können, sind bei der automatischen Fensterlüftung bauartbedingt ausgeschlossen.

Die Nachteile, die durch die fehlende Kontrolle des Luftwechsels und die geringe Beeinflussungsmöglichkeit des Aussenluftvolumenstroms entstehen können, lassen sich durch intelligente Steuerung und Konstruktion verringern. Dabei sind vordergründig der Kaltluftabfall an den Fenstern sowie die Zuglufterscheinungen von Belang. Der Kaltluftabfall wird durch den ausreichenden Abstand zwischen den Schülertischen und den Fensterfronten abgemindert.

Durch die Automatisierung der Fensterbedienung fällt der im SIA-Merkblatt 2023 genannte erhöhte Bedienungsaufwand weg.

Die Einbruchssicherung kann durch die geeignete Konstruktion der Fenster (Einbau von Oberlichtern) und der Beschläge (widerstandsfähiger Stahl) erreicht werden.

Einsatzgrenzen

Die Einsatzgrenzen der Fensterlüftung werden im SIA-Merkblatt 2023 definiert und sollten beachtet werden. Massgeblich sind die Parameter „Lärm“, „Luftschadstoffe“ (Stickstoffdioxid NO₂ und Feinstaub PM10) und die Pollenbelastung. Dabei wird nicht zwischen manuell und automatisch betätigten Fensterlüftungen unterschieden.

Technische Umsetzung im Schulhaus Ilgen

Ein Vergleich der Lüftungssituationen vor und nach der Sanierung kann nur auf der Basis von Annahmen getroffen werden. Historische Konstruktionen weisen oft –bedingt durch Undichtheiten in der Gebäudehülle, den Fenstern und der Dachkonstruktion– hohe Luftwechselraten auf. Durch die Sanierung der Gebäude wird die Luftdichtheit in der Regel deutlich erhöht und eine kontrollierte Be- und Entlüftung erforderlich.

Generell kann festgestellt werden, dass die automatische Fensterlüftungsanlage am Gebäude gemäss ihrer technischen Spezifikationen funktioniert.

Die Bestandteile der Anlage sind konstruktiv gut in das Gebäude implementiert. Die Sensoren sind an geeigneten Stellen im Raum platziert, die Stellmotoren verdeckt in die Rahmen der Fenster eingebaut. Der verdeckte Einbau erhöht jedoch den Reparaturaufwand im Schadensfall.

Im laufenden Betrieb wird die Funktion der Anlage von den Raumnutzern nicht wahrgenommen, da die Aktoren und die Fenstermechanik sehr geräuscharm arbeiten.

Dem Raumnutzer wird die Möglichkeit gegeben, den Automatikbetrieb der Anlage per Handeingriff zu übersteuern. Somit wird beim Nutzer der Eindruck vermieden, völlig einer Maschine „ausgeliefert“ zu sein.

Die Mensch-Maschine- Schnittstellen der Steuerungssoftware, beispielsweise die Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware, sind nicht optimal gestaltet und bieten aus ergonomischer Sicht einige Verbesserungsmöglichkeiten.

Die Raumhöhe von 3.8 m bietet den Vorteil, dass sich die einströmende Frischluft rasch aufwärmen kann und nicht direkt auf die im Raum befindlichen Personen trifft.

Zuglufterscheinungen durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten werden reduziert, da die maximale Spaltbreite, bis zu der die Fenster im Proportionallüftungsbetrieb angeklappt werden können, auf 2 cm begrenzt ist.

Im Schulhaus A fällt im Winter besonders der Gruppenraum 202 im 2.OG (Zone 9) durch ungenügende RLQ auf, was einerseits auf das geringe Raumvolumen und andererseits auf die fehlende Möglichkeit zur Querlüftung zurückzuführen ist. Die Lage im Lee der Hauptwindrichtung (S bis SW) und die aerodynamische Beeinflussungen durch den Dachüberstand können weitere Ursachen für einen nicht ausreichenden Luftwechsel in diesem Raum sein. Die Betrachtung der Dynamik des Verlaufs des CO₂-Gehalts deutet auf eine zeitlich begrenzte Nutzung mit hoher Intensität hin.

Weiterhin sind im Herbst zwei Räume (Zonen 7 und 9) mit lediglich ausreichender RLQ zu beobachten. Im Winter steigt die Anzahl der Zonen mit nur noch ausreichender RLQ weiter an. So erreichen die Zonen 1, 5, 7, 8 und 10 zwischen 25.01.2013 und 28.02.2013 lediglich eine ausreichende RLQ. Obwohl alle fünf Räume quer gelüftet werden können und am Tage gut vom Wind angeströmt werden, reicht der Luftwechsel nicht aus, um eine gute Raumluftqualität zu gewährleisten.

Die Ursachen dafür könnten auf eine intensive Raumnutzung mit hoher Personenbelegungsdichte zurückzuführen sein. Zur Verbesserung der RLQ wäre es zu empfehlen, die automatische Fensterlüftung auf häufigere Stosslüftungsintervalle, z.B. während der Mittagspause oder in den Unterrichtspausen zu programmieren.

Im Schulhaus B erreichen vier Klassen- und Gruppenzimmer im 1. und 2.OG (Zone 31, 38, 39 und 40), welche mit Ausnahme der Zone 39 über die Möglichkeiten zum Querlüften verfügen, während der Wintersaison nur selten eine ausreichende RLQ. Die Ursache hierfür könnte in der ungünstigen Lage dieser Räume im Windschatten von Nachbargebäuden (Schulhaus A und Turnhalle) liegen (siehe Abbildung 2). Am Tag wird das Gebäude während der Wintersaison meist aus südlicher und westlicher Richtung angeströmt, während der

Nacht meist aus nordöstlicher Richtung. Die Räume mit in nordwestlicher und nordöstlicher Richtung orientierten Fenstern (Zonen 39 und 40) werden dadurch am Tage nicht ideal angeströmt.

Unklar ist, aus welchem Grund die Räume mit südwest-orientierten Fenstern (Zonen 31 und 38) eine ungenügende RLQ aufweisen. Beide Räume werden am Tage günstig vom Wind angeströmt und können quer gelüftet werden.

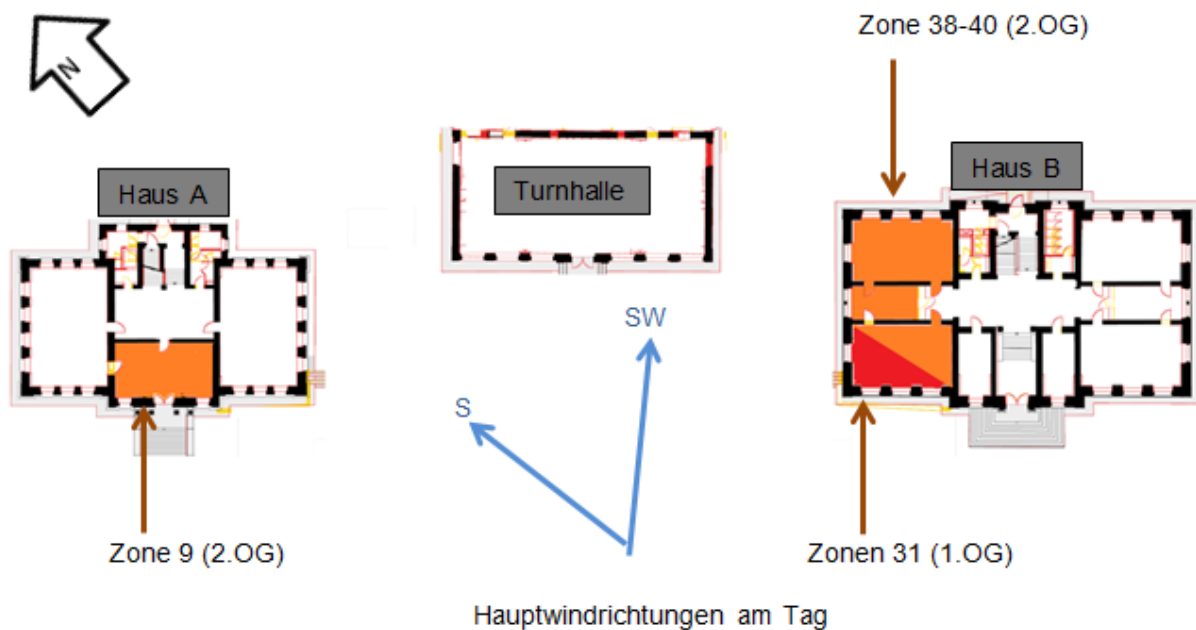


Abbildung 2: Anströmsituation, Lage der Räume mit unzureichender RLQ

Die Fenster an beiden Schulhäusern sind mit Aussenstoren zur Gewährleistung des sommerlichen Wärme- und Blendschutzes ausgestattet. Die Storen sind mit geringem Abstand zum klappbaren oberen Fensterflügel montiert. Wie in Anhang 1 (Abbildung Fenster) zu erkennen ist, wird der Lüftspalt bereits bei gering ausgefahrenem Sonnenschutz teilweise oder ganz verdeckt und dadurch die Luftzirkulation zwischen Raum- und Aussenluft stark reduziert. Es ist denkbar, dass die Aussenstoren dadurch den konvektiven Luftaustausch bei geöffneten Fenstern stark behindern. Ein weiterer Grund für die unzureichende RLQ in den Räumen des 1. und 2.OG im Schulhaus B könnte in der Stauwirkung der Fensterlaibungen [1] und des Dachvorsprungs zu suchen sein. Aus einem geöffneten Fenster ausströmende Luft kann durch diese horizontalen Barrieren am Aufsteigen gehindert werden und zu einem „Abluftstau“ führen.

Generell muss angemerkt werden, dass die Anreicherung von CO_2 im Gebäude durch das derzeit etablierte Regelschema der automatischen Fensterlüftung bei niedrigen Aussenlufttemperaturen und inaktiver Nachtauskühlung nicht verhindert werden kann.

Dies ist auf Fehler beim Einbau der Anlage und bei der In-Betrieb-Setzung zurückzuführen, die im ersten Betriebsjahr zu erkennbaren Beeinträchtigungen der Anlagenfunktion geführt haben.

Zur weiteren Verbesserung der Raumluftqualität sollten die in den nachfolgenden Kapiteln genannten technischen, organisatorischen und konstruktiven Punkte an der Fensterlüftungsanlage und am Gebäude verändert werden.

Verbesserungsvorschläge für die untersuchte Anlage

In-Betrieb-Setzung

Für die In-Betrieb-Setzung von Anlagen mit automatischer Fensterlüftung sollte ein standardisiertes Vorgehen definiert, dokumentiert und vollzogen werden.

Vor der In-Betrieb-Setzung sollten alle installierten Sensoren auf einwandfreie Funktion geprüft und kalibriert werden. Bei CO₂-Sensoren könnte dies durch eine Referenzmessung mit einem Prüfgas definierter Konzentration erfolgen. Alternativ wäre es möglich, die Messwerte der Sensoren zu einem Zeitpunkt ohne Personenbelegung zu registrieren. Dabei sollten sich Werte von etwa 400 ppm einstellen.

Die fehlerfreie Funktion der Temperatursensoren sollte vor In-Betrieb-Setzung ebenfalls geprüft werden. Empfehlenswert wäre eine Parallelmessung mit einem Handthermometer.

Konstruktion

Der innere Blendschutz sollte so vor den Fenstern platziert werden, dass der Lüftungsspalt der Fenster nicht verdeckt und der Luftaustausch dadurch behindert wird. Gegebenenfalls sollten bereits installierte Sonnenstoren unplatziert werden. Die Steuerung der Aussenstoren sollte mit der Öffnung der Fenster harmonisieren.

Weiterhin wäre es in Räumen ohne Querlüftung hilfreich, eine Möglichkeit zur Luftnachströmung zu schaffen und die im Gebäude herrschende Thermik zur Erhöhung des Luftwechsels zu nutzen. Denkbar wären beispielsweise Überströmöffnungen in Richtung des Flurs und des Treppenhauses.

Steuerung

Der Steuerrechner der automatischen Fensterlüftungsanlage sollte redundant konfiguriert werden.

Grundsätzlich sollte die Steuerung der automatischen Fensterlüftung so ertüchtigt werden, dass die Öffnungsweite der Fenster dem CO₂-Gehalt der Raumluft folgt. Der CO₂-abhängigen Steuerung sollte in der Regelhierarchie die gleiche Priorität wie der Temperatursteuerung eingeräumt werden.

Die Dauer der morgendlichen Stosslüftung (derzeit 3 Minuten Länge) reicht nicht immer aus, um CO₂-Gehalt eines hoch belasteten Raumes deutlich unter 800 ppm zu senken.. Die Dauer der morgendlichen Stosslüftung sollte daher in beiden Gebäuden mit Beginn der Heizperiode auf 5 bis 10 min verlängert werden.

Während der Mittagspause und am Abend sollte eine weitere Stosslüftung insbesondere dann durchgeführt werden, wenn der CO₂-Gehalt des Raumes über 800 ppm liegt.

Die durch die zusätzlichen Stosslüftungen auftretende Erhöhung des Lüftungswärmeverlusts kann vernachlässigt werden

In Räumen ohne Querlüftungsmöglichkeit sollten individuelle, der Nutzungsintensität entsprechende Öffnungsdauer und -frequenzen festgelegt werden. In der Praxis könnte dies geschehen, in dem die Fenster nach jeder Unterrichtslektion solange geöffnet werden, bis der CO₂-Gehalt den Wert von 800 ppm unterschreitet.

Die RLQ könnte ebenfalls verbessert werden, wenn der Initialwert des CO₂-Gehalts, ab dem die Fenster eines Raumes geöffnet werden von 800 ppm auf 600 ppm abgesenkt würde. Um den Lüftungswärmeverlust im Winter und in den Übergangsjahreszeiten zu reduzieren, sollte eine Hysterese vorgesehen werden. Die Hysterese könnte folgendermassen aufgebaut sein:

Bei ansteigendem CO₂-Gehalt: Fenster öffnen bei Werten über 600 ppm.

Bei fallenden CO₂-Gehalt: Fenster schliessen bei Werten unter 800 ppm.

Die Aufzeichnung der CO₂- und Temperaturwerte sollte zeitlich mit der Erfassung der Stellung der Fensteraktoren harmonisiert werden. Es ist sinnvoll, die Öffnungsweite der Fenster im selben Zeitraster (z.B. in 15-Minuten-Intervallen) wie den CO₂- Gehalt sowie die Raumlufttemperatur zu erfassen.

Die Parametrierung sollte neben der geschossweisen Wertezuordnung auch eine fassadenweise Festlegung ermöglichen. Damit könnte eine bessere Anpassung an die Anströmsituation erreicht werden.

Die Überwachung der Funktionsfähigkeit der automatischen Fensterlüftung erfordert derzeit einen erheblichen Zeitaufwand für die hauptverantwortliche Person. Im Moment ist die grafische Darstellung der Funktionalität in der Anlagensoftware stark raumspezifisch ausgelegt. Für einen schnellen Überblick über alle Zonen der Gebäude ist es im Moment notwendig, die CO₂- und Temperaturverläufe aller Räume einzeln aufzurufen. Es wäre hilfreich, ein „Übersichtstabelleau“ mit allen Zonen zu etablieren, um die RLQ im gesamten Gebäude auf einen Blick einschätzen zu können. Es wäre denkbar, einen einfachen Bewertungsindikator im Steuerungssystem der automatischen Fensterlüftung zu implementieren. Beispielsweise könnte mit einer „Ampelsymbolik“ die im Laufe eines Tages vorherrschende Raumluftqualität farbig skaliert und intuitiv ablesbar dargestellt werden. Die Abstufung könnte wie folgt aussehen:

Gut (grünes Symbol):	LQ100 > 75%,
Ausreichend (gelbes Symbol):	50% > LQ100 >= 75%,
Ungenügend (rotes Symbol):	LQ100 <50%.

Es bietet sich an, die Ampelsymbolik ebenfalls für die Bewertung der Raumlufttemperaturen zu übernehmen. Es werden folgende Kategorien vorgeschlagen:

Zu kalt (blaues Symbol): mittlere Raumlufttemperatur während sechs Stunden < 20 °C,

Angenehm (grünes Symbol): mittlere Raumlufttemperatur während sechs Stunden zwischen 20 °C und 26.5 °C (Sommer) oder zwischen 20 °C und 22 °C (Winter),

Zu warm (rotes Symbol) mittlere Raumlufttemperatur während sechs Stunden > 26.5 °C (Sommer) oder > 22 °C (Winter).

Bei der Gestaltung der Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware sollte ein besonderes Augenmerk auf eine vereinfachte Bedienbarkeit und gute Übersichtlichkeit gelegt werden. Auf die Verwendung von aufwändig animierten Icons (z.B. fallende Regenwolken) sollte verzichtet werden.

Betrieb

Die automatisierte Umschaltung von Sommer- auf Winterbetrieb respektive die Aktivierung / De-aktivierung der Nachtabenkung erfolgt derzeit automatisch bei Über- / Unterschreiten eines Schwellenwerts. Dies kann z.B. im Frühjahr und Herbst zu erhöhten Lüftungswärmeverlusten führen. Das Umschalten sollte manuell oder per fest definierter Umschalttage erfolgen. Die Schalttage sollten mit dem Beginn und Ende der Heizsaison synchronisiert werden. Es ebenfalls denkbar, den Umschaltzeitpunkt basierend auf den durchschnittlichen Nachttemperaturen festzusetzen.

Zu Sicherstellung der dauerhaften Funktionsfähigkeit der automatischen Fensterlüftungsanlage sollten regelmässige Wartungs- und Kontrollintervalle für die Sensoren und Aktuatoren eingeführt werden.

Anmerkungen zum Datenschutz

Durch die zeitlich hoch aufgelöste Untersuchungen des CO₂-Gehalt in Klassenräumen kann auf die darin stattfindenden menschlichen Aktivitäten geschlossen werden. Beispielsweise können Rückschlüsse auf die Präsenzzeiten und die Zahl der Personen im Raum gezogen werden. Unter dem Aspekt der Einbruchssicherung ist es bedenklich, Rohdaten oder die daraus-gewonnenen Informationen frei und ohne Anonymisierung der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Solche Daten sollten grundsätzlich vertraulich behandelt und vor einer Publikation anonymisiert werden.

Die im Gebäude eingesetzte Steuerungssoftware ermöglicht neben dem Zugriff auf die automatische Fensterlüftung auch die Möglichkeit, weitere z.T. grundlegende Gebäudefunktionen zu beeinflussen. Derzeit kann ohne hierarchische Stufung vollumfänglich auf alle wesentlichen Anlagenfunktionen zugegriffen werden. In ungünstigstem Falle könnte derzeit die Anlage durch einen nicht autorisierten Zugriff vollständig ausser Betrieb gesetzt werden. Es wird daher dringend angeraten, hierarchisch gestufte Benutzerregeln einzuführen.

2.2 Modul 2: Planungshandbuch für zukünftige Anlagen

Grundlagenermittlung

Folgende Punkte sollten zu Beginn der Planung einer automatischen Fensterlüftungsanlage beachtet werden:

Abklären der erforderlichen Massnahmen

Definition und Formulierung der Aufgabenstellung,

Begehung des Gebäudes,

Festlegen, in welchem Masse weitere Experten hinzugezogen werden sollen,

Ermitteln, Definieren und Evaluieren von Ausführungsumfang und –details

Prüfen und Bewerten der zur Verfügung stehenden Unterlagen und Dokumente (Pläne, Berechnungen, technische Dokumentationen)

Beurteilen der Bausubstanz

Analyse des Gebäudes und der Bausubstanz mit Bezug auf Durchführbarkeit und erwartetem Aufwand,

Prüfen auf etwaiges schützenswertes Inventar, auf Bestandsschutz und Denkmalaspekte,

Überprüfen der dokumentierten Befunde, Auswerten der Bestandsaufnahme,

Dokumentation der Ergebnisse.

Projektierung

Sensoren für CO₂ und Temperatur

Bereits bei der Planung der Anlage sollte festgelegt werden, wie viele Sensoren für den Betrieb der Fensterlüftungsanlage erforderlich sind. Optimal wäre es, für jeden aktiv gesteuerten Raum einen Sensor für Raumlufttemperatur und CO₂-Gehalt vorzusehen. Ebenfalls sollte die Güte und Messgenauigkeit der Sensoren definiert werden. Die Installationsorte sollten nach folgenden Kriterien gewählt werden:

Der Sensor sollte nicht direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt werden

Er darf nicht vor mechanischer Beeinflussung geschützt montiert werden.

Ideal wäre die Anbringung der Sensoren an der von der Fensterfront abgewandten Zimmerwand in etwa 1.5 m Höhe.

Die nachträgliche Installation von Fensteraktoren und Raumsensoren ist in der Regel aufwendig.

Interaktion mit dem Heizungssystem

Die Zeitpunkte, die den Beginn und das Ende der Heizsaison und der Phase mit aktivierter Nachtauskühlung markieren, sollten zeitlich synchronisiert werden.

Ebenfalls sollte die Fensterlüftungssteuerung einen Einfluss auf die Heizwärmezufuhr des Raumes haben. Beispielsweise könnten die Thermostatventile der Heizkörper selbsttätig schliessen, wenn die Fenster des Raumes geöffnet werden.

Morphologischer Entscheidungsbaum

Als Orientierung und Interpretationshilfe für die schnelle Beurteilung der Gebäudesituation wird der im Anhang¹⁸ aufgeführte Morphologische Kasten vorgeschlagen.

Die Punkte sind wie folgt zu interpretieren:

Gebäudestandort

Der Standort eines gut für die automatische Fensterlüftung geeigneten Gebäudes sollte folgende Kriterien erfüllen:

Das Gebäude sollte in ausreichendem Abstand zu Nachbargebäuden stehen.

In der direkten Umgebung des Gebäudes sollten sich keine Strömungshindernisse befinden.

Ein gut geeignetes Gebäude steht frei und kann von allen Gebäudeseiten ungehindert angeströmt werden.

Hohe Hindernisse in kurzer Distanz, die eine oder mehrere Gebäudefronten überdecken, sind ungünstig.

Es sollte möglich sein, eine Wetterstation an einem vom Gebäude möglichst gering beeinflussten Standort oder auf dem Gebäudedach zu installieren.

Die mesoklimatischen Details des Gebäudestandorts sollten vorab durch Analyse der Anströmungsbedingungen, durch Auswertung der Windrichtung und Betrachtung der Windgeschwindigkeiten über die Dauer eines kompletten Jahres untersucht werden. Es bietet sich an, dafür, den Datensatz einer standortnahen *Meteo-Swiss*-Klimastation zu nutzen.

Es sollte geprüft werden, ob die im SIA-Merkblatt 2023 (Kapitel „Einsatzgrenzen“) aufgeführten Grenzwerte für Stickstoffdioxid und Feinstaub am Gebäudestandort eingehalten werden. Dazu sollten die Daten des zuständigen Lufthygieneamtes konsultiert und bewertet werden.

Der Aspekt der Lärmbelastung sollte standortspezifisch bei der Planung berücksichtigt werden. An stark lärmgefährdeten Lagen ist es denkbar, nur die von der Lärmquelle abgewandte Gebäudeseite mit automatisch öffnenden Fenstern auszustatten.

Fassade

Das freie Ein- und Ausströmen der Luft sollte nicht durch Hindernisse an der Fassadenseite beeinträchtigt werden.

Ideal wären möglichst wenige Dachüberstände, Vorsprünge, Fassadensimse mit geringer Ausprägung.

Ausgeprägte Fassadenvorsprünge, Lisenen und Borde können zu ungünstigen Anströmverhältnissen führen.

Grundriss des Raumes

Ideal für den optimalen Betrieb einer automatischen Fensterlüftungsanlage sind gegenüberliegend im Raum angeordnete Fenster.

Fenster, die im Raum über Eck angeordnet sind, sind ebenfalls gut geeignet,

Bei einseitig im Raum angeordneten Fenstern sollte eine Überströmmöglichkeit (beispielsweise in Richtung des Flurs und des Treppenhauses) geschaffen und die im Gebäude herrschende Thermik zur Erhöhung des Luftwechsels genutzt werden.

Verwinkelte Räume (z.B. L- oder U-Form) sind ungünstig.

Raumtiefe

Die Vorgaben des SIA-Merkblattes 2023 zum Verhältnis der Raumlänge zur –höhe sollten beachtet werden. Zudem sollte berücksichtigt werden, dass die Platzierung der Heizkörper unter den Fenstern einen wesentlichen Einfluss auf die Eindringtiefe der zuströmenden Luft hat.

Raumhöhe

Ausreichend hohe Räume ermöglichen eine gute thermisch bedingte Zirkulation der Raumluft.

Die lichte Raumhöhe sollte 2,5 m nicht unterschreiten.

Feste Einbauten oder hohe Möbel, welche die Durchströmung des Raumes behindern könnten, sind kritisch.

Fenster

Die Fenster des zu lüftenden Raums sollten über Kipp-, Dreh oder Übersetzflügel verfügen. Mehrteilige Fenster mit in zwei übereinander angeordneten Fensterreihen sind besonders geeignet.

Bei mehrteiligen Fenstern mit Oberlichtern sollte mindestens ein Flügel kipp- oder drehbar sein,

Bei Kippfenstern sollte der Öffnungswinkel so bemessen sein, dass ein ausreichend breiter Lüftspalt entsteht.

Geöffnete Fensterflügel dürfen nicht in den Klassenraum oder in die Verkehrsfläche ragen. Bei Fluren muss bei vollständig geöffneten Fenstern die Mindestbreite eines Fluchtweges gewährleistet werden.

Bei Drehflügelfenstern sollte der Schwenkwinkel so begrenzt werden, dass ein Herausfallen von Gegenständen oder ein Abstürzen von Personen unter allen Umständen ausgeschlossen werden kann.

Der Abstand zwischen Rahmen des Fensters und der Fensterlaibung muss ausreichend weit dimensioniert sein.

Die Tiefe der innen- und aussenliegenden Fensterlaibungen sollte nicht zu tief ausfallen, bei tiefen Laibungen wird die Anströmung behindert

Fensterlaibungen sollten keine oder nur wenig ausgeprägte Absätze, Kanten, Verbauungen besitzen, die das Ein- und Ausströmen der Luft behindern könnten.

Jegliche Anbauten an den Fenstern, die die effektive Öffnungsfläche reduzieren, sollten vermieden werden.

Die Fensterrahmenbreite sollte so dimensioniert sein, dass sich die Stellmotoren im Rahmen integrieren lassen. Eine Aufbaumontage, beispielsweise am Montageplatz des Öffnungshebels ist ebenfalls möglich.

Automatisch betätigte Fenster sollten über einen Einklemmschutz und über eine Einbruchssicherung verfügen.

Konventionell von Hand zu öffnende Fensterflügel erleichtern das Stosslüften. Es sollte darauf geachtet werden, dass sich automatisch betriebene und manuell bedienbare Fensterflügel nicht gegenseitig behindern. Auch sollten die Nutzer des Raums informiert werden, dass unsachgemäss geöffnete Fenster die Funktionsfähigkeit der automatischen Fensterlüftung stark beeinträchtigen können.

Sonnen- und Blendschutz

Installierte innere und /oder äussere Storen / Jalousien/ Lamellenvorhänge sollten so platziert werden, dass die effektive Öffnungsfläche des Fensters nicht verdeckt wird.

Empfehlung für den Anlagenbetrieb

Phase vor der Inbetriebsetzung

Am Ende der Ausführungsphase, jedoch vor der ersten Nutzung ist eine genaue Montagekontrolle der installierten Anlage erforderlich. Die Montagekontrolle bietet die letzte Gelegenheit, um entsprechende Korrekturmassnahmen ohne grossen Mehraufwand einzuleiten. Dabei ist zu prüfen, ob die Installation mit den spezifizierten Vorgaben übereinstimmt und die Anlagekomponenten korrekt montiert wurden. Es ist darauf zu achten, dass alle Bestandteile der Anlage entsprechend ihrer Positionsnummern und in Übereinstimmung mit dem Anlagenschema und anderen Dokumenten montiert worden sind.

Für eine zuverlässige Messwerterfassung ist die richtige Position und korrekte Montage der Sensoren und Aktuatoren wichtig. Es sollte vorab geprüft, ob alle Sensoren am vorgesehenen Ort installiert wurden.

Voraussetzung ist, dass alle Arbeiten an der Elektro- und MSR-Installationen vor der Inbetriebsetzung vollständig abgeschlossen wurden. Die folgenden Vorbereitungen sollten getroffen werden:

Zur Vorbereitung der Inbetriebsetzung sollte eine Taktrandenliste / ein Programm erstellt werden.

Der Termin und der Ort sollten verbindlich festgelegt und mit allen Teilnehmenden abgestimmt werden. Die folgenden Dokumente sollten für die Inbetriebsetzung verfügbar sein:

- Ein Prinzipschema (Steuerung und Regelung) und Installationspläne (Elektro, MSR, HKL)
- Die technischen Datenblätter wichtiger Anlagenbestandteile (Aktuatoren, Sensoren)
- Eine Liste der Einstellparameter, der Sollwerte und Regelkurven
- Alle Funktionsbeschreibungen, Bedienungsanleitungen für die Anlage oder für einzelne Anlagenteile
- Alle Datenlisten für Sensoren, Aktuatoren und für die Wetterstation

Funktionskontrolle

Um eine Inbetriebsetzung erfolgreich vornehmen zu können, ist es von grosser Bedeutung, sämtliche installierte Sensoren, Aktuatoren und die Installation selbst einzeln auf korrekte Funktion zu prüfen.

Die Elektroanschlüsse aller Sensoren und Aktuatoren müssen durch eine autorisierte Fachperson kontrollieren werden. Alle elektrischen Verbindungen sind anhand des Elektroschemas auf korrekte Ausführung zu überprüfen.

Die Messfühler (CO₂- und Raumlufttemperatur) sind einer Sichtkontrolle zu unterziehen. Die fehlerfreie Funktion der Wetterstation kann durch einen Quervergleich mit den Daten einer standortnahen *MeteoSwiss*-Klimastation geprüft werden

Die Funktion der Fenstermotoren kann geprüft werden, indem das Fenster per Handbetätigung geöffnet und geschlossen wird. Es sollte darauf geachtet werden, dass alle Fenster eines Raumes in etwas gleicher Zeit öffnen und schliessen. Dabei eventuell auftretende Störgeräuschen (Quietschen, Schwergängigkeit oder Spiel) sollten beachtet werden.

Die Reaktion der CO₂-Fühler sollte stimuliert werden (z.B. durch Einsprühen mit Druckluftspray mit CO₂ als Treibmittel). Der CO₂-Messwert sollte dabei stark ansteigen.

Die Reaktion des Temperatursensors kann durch Besprühen mit Eisspray getestet werden.

Alternativ ist es möglich, den Raum über Nacht vollständig zu durchlüften und dabei zu prüfen, ob sich die Aussenlufttemperatur und die Raumlufttemperatur annähern. Der CO₂-Gehalt der Raumluft sollte dabei auf das Aussenluftniveau (390 ppm bis 400 ppm) absinken.

Aus energetischen Gründen sollte diese Prozedur nur bei ausserhalb der Heizperiode durchgeführt werden.

Das Ergebnis der Prüfung sollte dokumentiert werden und den Teilnehmenden der Inbetriebsetzung vorab zur Verfügung gestellt werden.

Inbetriebsetzung

Die Inbetriebsetzung sollte erst dann erfolgen, wenn alle Aktuatoren, Sensoren und die Installation der Anlage vollständig geprüft wurden und betriebsbereit sind. Für die Inbetriebsetzung sollte eine hauptverantwortliche Person definiert werden. (Idealerweise eine mit den Planungsdetails vertraute Fachperson). Es sollten folgende Dokumente und Informationen vorliegen.

- Die Protokolle aller Funktionskontrollen der Anlage sowie aller Aktuatoren und Sensoren
- Die in der Anlagenparametrierung gespeicherten Werte sowie die
- Die vom Nutzer veränderbare Anlagenparameter
- Die einzuhaltenden Grenzwerte (z.B. minimale und maximale Raumlufttemperaturen, maximal zulässige Fensteröffnungsweiten)
- Die im Probetrieb eingestellten Anlagenparameter

Zur Inbetriebsetzung sollte sich die Anlage im Probetrieb befinden. Im Rahmen der Abnahmeprozedur sollte geprüft werden, ob die Anlage im Ganzen gemäss ihrer Spezifikation funktioniert. In jedem Raum sollte separat geprüft werden, ob sich die Fenster nach einer Zeit mit Personenbelegung selbsttätig öffnen und nach dem Luftwechsel wieder schliessen.

Die Inbetriebsetzung sollte in einem Abnahmeprotokoll dokumentiert werden.

Die Funktion der Anlage sollte über mindestens ein Betriebsjahr im Probebetrieb kontinuierlich überwacht werden. Die Raumluftqualität und die thermische Situation im Probebetrieb könnte mit den im Modul 1 dieses Schlussberichtes beschriebenen Methoden qualitativ bewertet werden. Der Probebetrieb sollte für eine Betriebsoptimierung genutzt werden.

Die für die Haustechnik verantwortlichen Personen am Gebäude sollten mindestens dreimal zu unterschiedlichen Zeitpunkten geschult und in die Bedienung der Anlage eingewiesen werden.

Betrieb

Automatische Fensterlüftungsanlagen sind keine autonomen Selbstläufer. Die einwandfreie Funktion einer Anlage kann im laufenden Betrieb nur durch regelmässige Kontrolle und ggf. durch Wartung und Reparatur sichergestellt werden. Dafür sind folgende Punkte wesentlich:

In kürzeren Abständen (z.B. wöchentlich bei regulärem Unterrichtsbetrieb) sollte eine Erfolgskontrolle durchgeführt werden. Es sollte vordergründig geprüft werden, ob die RLQ & RLT in der zurückliegenden Periode den Qualitätsanforderungen entsprochen hat.

Bei anhaltend schlechter Raumluftqualität sollte gezielt nach der Ursache gesucht werden und diese abgestellt werden.

Für eventuelle Betriebsstörungen sollte eine Vorgehensweise definiert werden. Die Kommunikation im Störfall sollte klar festgelegt sein und zeitnah erfolgen

Zwischen der für die Haustechnik verantwortlichen Person am Gebäude, dem Partner bei der Bauaufsichtsbehörde und der Installationsfirma sollte klar definiert sein, wann welche Information an wen weitergegeben wird. Es sollte Wert auf kurze Reaktionszeiten gelegt werden.

In wiederkehrenden Abständen (beispielsweise in jährlichen Intervallen) sollte die einwandfreie Funktion aller Aktuatoren und Sensoren überprüft werden.

Die mechanischen Stellglieder (Aktuatoren) sollten regelmässig gewartet werden. Sinnvoll ist es, Ersatzteile (Sensoren und Stellantrieb) zu bevorraten.

Der Steuerungsrechner sollte regelmässig gesichert werden. Idealerweise sollte eine gespiegelte Festplatte mit vollständig gesichertem Betriebssystem und einsatzbereit parametrierter Steuerungssoftware vorrätig gehalten werden.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wäre es sinnvoll, eine Aufzählung aller aktuellen Fehlermeldungen (z.B. Aktuatoren-Ausfall) auf der Startseite der Steuerungssoftware zu implementieren.

3 Sicht des Auftraggebers

Schulhäuser werden gebaut, um Kindern einen Ort der optimalen Wissensvermittlung geben zu können. Die Luftqualität in den Klassenräumen hat einen entscheidenden und messbaren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Gebäudenutzer. Alle Messkampagnen in den unterschiedlichsten Ländern zeigen, dass in dicht belegten Klassenzimmern ohne System zur kontrollierten Lüfterneuerung die Luftqualität nach ungefähr 30 Minuten ungenügend wird. Ebenso kann gezeigt werden, dass die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit aufgrund mangelhafter Luftqualität weit über 10 % ausmachen.

Der Mensch verfügt über kein Organ, welches ihm signalisiert, dass die Luftqualität ungenügend wird. Entsprechend ist es ihm nicht möglich, richtig zu lüften. Es ist für den Menschen unmöglich, den richtigen Zeitpunkt zum Öffnen und wieder Schliessen der Fenster zu bestimmen. Aus diesem Grund werden Klassenzimmer sehr oft mit mechanischen Lüftungssystemen ausgerüstet. Zusätzlich haben konventionelle Lüftungssysteme den Vorteil, dass die Wärme im Sommer draussen und im Winter drinnen bleibt. Ebenso kann die Luft weitgehend von Pollen befreit werden und die Lüftung funktioniert unabhängig von den Aussenbedingungen (Wind, Lärm, Aussentemperatur, Regen).

Besonders bei Instandsetzungsprojekten ist der Einsatz von mechanischen Lüftungsanlagen eine bauliche Herausforderung. Insbesondere dann, wenn aus denkmalpflegerischen Gründen keine dezentralen Lüftungssysteme eingesetzt werden können und zu wenig Platz für die Leitungsführung zentraler Lüftungsanlagen vorhanden ist.

Automatisierte Fenster bieten eine Möglichkeit, eine gute Luftqualität für die Nutzerinnen zu gewährleisten. Das in der Schulanlage Illgen eingesetzte System mit sich langsam und je nach Bedarf nur teilweise öffnenden Fenstern wird von den Nutzern akzeptiert. Die Luftqualität kann dank der Installation mehrheitlich im vorgeschriebenen Bereich gehalten werden.

Die beiden an einer ruhigen Lage situierten Schulhäuser eignen sich für den Einbau einer automatisierten Fensterlüftung. Praktisch alle Klassenzimmer verfügen an mindestens zwei Fassaden über hohe Fenster mit obenliegenden Kippflügeln. Dadurch können die Räume effizient und risikolos (Einklemmgefahr) belüftet werden. Die Abhängigkeit der Luftqualität vom Wetter bleibt jedoch bestehen.

Dank den automatischen Fenstern ist in der Übergangszeit und in kühleren Sommernächten eine effiziente Nachtauskühlung der Klassenräume möglich. Während sommerlichen Schönwetterperioden überhitzen die Klassenräume trotzdem, da zusätzlich zu den hohen inneren und äusseren Wärmelasten aus hygienischen Gründen auch noch viel warme Luft ins Klassenzimmer einströmt.

Bei rund einem Viertel der Klassenzimmer funktionierte zu Beginn der Messkampagne das Lüftungssystem nicht richtig und auch die Sommer-Winter-Umstellung klappte nicht. Dies trotz enger Begleitung während der Bauphase und des Betriebs. Es hat sich gezeigt, dass die Komplexität automatisierter Fensterlüftungssysteme wesentlich höher ist, als dies auf den ersten Blick erscheint. Das System erfordert viele Sensoren und Motoren, es muss der

Einbezug des Sonnen-, Wind-, Regen- und Blendschutzes sichergestellt werden und je nach Situation sind Sicherheitseinrichtungen notwendig (Einklemmschutz). Diese hohe Technisierung muss sich in den nächsten zwanzig Jahren bewähren.

Die Untersuchung lässt die Frage nach der Energieeffizienz von Fensterlüftungssystemen offen. Sicher kann gesagt werden, dass dank des Einsatzes von CO₂-Fühlern die Räume nur mit der erforderlichen Luftmenge versorgt werden. Aus energetischer Sicht ist dies gegenüber der reinen Fensterlüftung unter Einhaltung des hygienisch notwendigen Volumenstroms sicher ein Vorteil.

Der Bauprozess wurde aufgrund der nicht notwendigen Lüftungskanäle von zentralen Lüftungsanlagen einfacher. Ebenfalls hat es sich bewährt, alle Sensoren und Antriebe und die gesamte Steuerung in einem Paket und entsprechend in einer Verantwortlichkeit auszu-schreiben.

Automatische Fensterlüftungen bieten nicht dieselben Vorteile wie Ventilator-gestützte-Lüftungssysteme und sie sind im Bau und Betrieb aufwändiger als dies auf den ersten Blick erscheint. Sie sind aber gegenüber manueller Fensterlüftung eine aus energetischer und vor allem hygienischer Sicht wesentliche Verbesserung und führen zu tieferen Investitionskosten als mechanische Lüftungssysteme. Entsprechend sind sie bei Instandsetzungsprojekten an ruhigen Lagen und bei Gebäuden welche eine Querlüftung zulassen, eine prüfenswerte Alternative.

4 Anhang

Im Projekt „BEGLEITEN AUTOMATISCHER FENSTERLÜFTUNG IN SCHUL-BAUTEN“ erstellte Dokumente

- [1] Zwischenbericht
- [2] Institutspräsentation
- [3] Hand-Out für die Projektbesprechungen

Weitere Literatur

- [1] M. Hall, «Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern, Dissertation,» 2004.
- [2] J. Dullin, i. Schaefer und M. Ross, «Kohlendioxid-Konzentraionen in Ausgewählten Bremer Schulen, Praxisbericht,» 2007.
- [3] H. Huber und A. Pfirter, «Optimierte automatische Fensterlüftung in Wohnbauten - Regelungskonzept, Zwischenbericht,» 2011.
- [4] S. Prestel, «Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Schulanlage Ilgen -Instandsetzung und Umbau, Baudokumentation,» 2012.
- [5] WindowMaster, «Schluhaus Ilgen, Vorschlag zur Natürlichen Lüftung,» 2010.
- [6] SIA 382/1, «Lüftungs- und Klimaanlageanlagen -Allgemeine Grundlagen und Anforderungen,» 2007.
- [7] W. Hässig und A. Galli, «Kontrollierte Fensterlüftung -Pilotprojekt Schulhaus Untermoos, Schlussbericht,» 2009.
- [8] SIA Merkblatt 2023, «Lüften in Wohnbauten,» 2008.
- [9] DIN EN 19337:09/2007, «Lüftung von Nichtwohngebäuden».
- [10] A. Maas, «Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung, Dissertation,» 1995.
- [11] R. Von Euw, Z. Alimpic und K. Hildebrand, «Gebäudetechnik Systeme integral planen,» 2012.
- [12] SIA Merkblatt 2028, «Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik,» 2009.

Weitere Anhänge

Anhang 1: Lageplan Schnitt und technische Details

Anhang 2: Gebäudegrundrisse

Anhang 3: Klimatische Bedingungen am Gebäudestandort

Anhang 4: schematischer Verlauf der CO₂-Gehalte der Klassenräume im Schulhaus A

Anhang 5: schematischer Verlauf der CO₂-Gehalte der Klassenräume im Schulhaus B

Anhang 6: Fensterverhalten während einer Kälteperiode (Räume im EG ,Schulhauses A)

Anhang 7: Fensterverhalten während einer Kälteperiode (Räume im 1.OG ,Schulhauses A)

Anhang 8: Verteilung der CO₂-Raumluftgehalte, Schulhaus A (8:00 bis 17:00 Uhr)

Anhang 9: Verteilung der CO₂-Raumluftgehalte, Schulhaus B (8:00 bis 17:00 Uhr)

Anhang 10: Raumluftqualität während des Unterrichts (8:00 bis 17:00 Uhr) im Schulhaus A

Anhang 11: Raumluftqualität während des Unterrichts (8:00 bis 17:00 Uhr) im Schulhaus B

Anhang 12: Raumlufttemperaturen, Schulhaus A

Anhang 13: Raumlufttemperaturen, Schulhaus B

Anhang 14: Raumlufttemperaturen während einer Hitzeperiode, Schulhaus A

Anhang 15: Raumlufttemperaturen während einer Hitzeperiode, Schulhaus B

Anhang 16: Fensterverhalten während einer Hitzeperiode (Raum 001 EG ,Schulhauses A)

Anhang 17: Morphologischer Kasten zur Beurteilung des Gebäudes

Anhang 18: Morphologischer Kasten, Interpretationshilfen

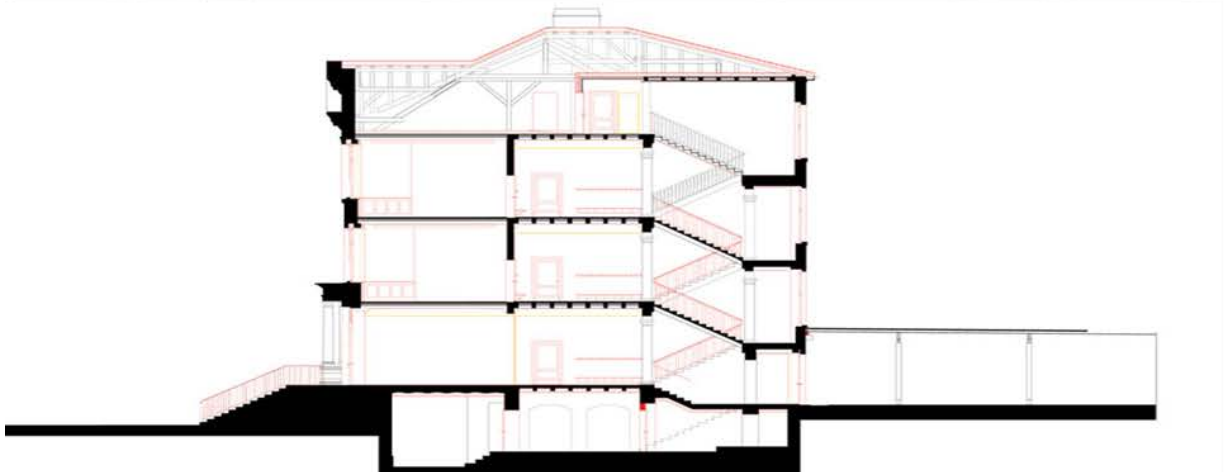
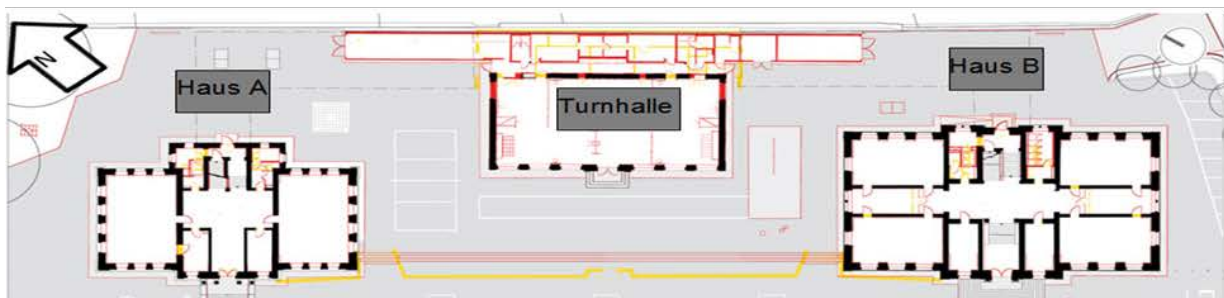
Anhang 1: Lageplan Schnitt und technische Details



Innen- und Aussenansichten des Gebäudes

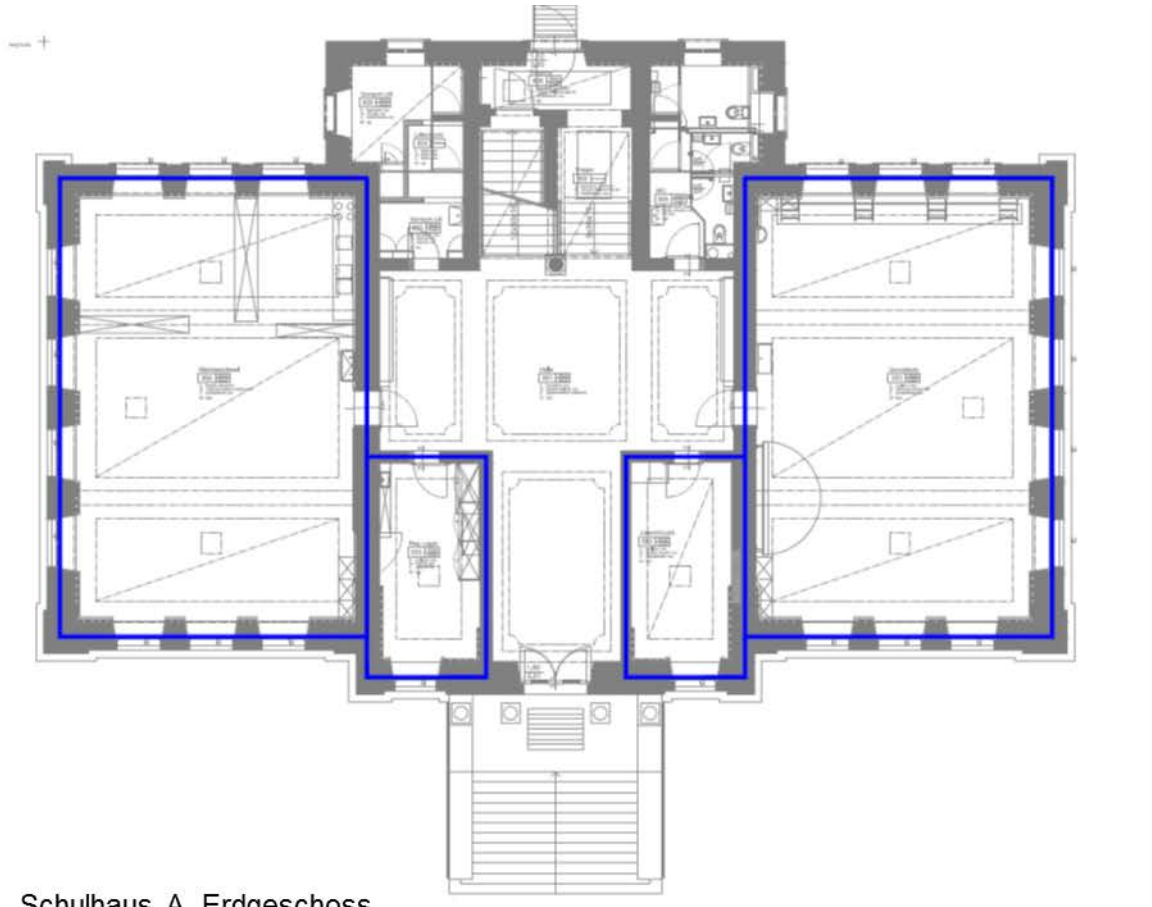


Fenster aussen, geöffnetes Oberlicht, Bedieneinheit, Raumlufttemperatur- und CO₂ Sensor

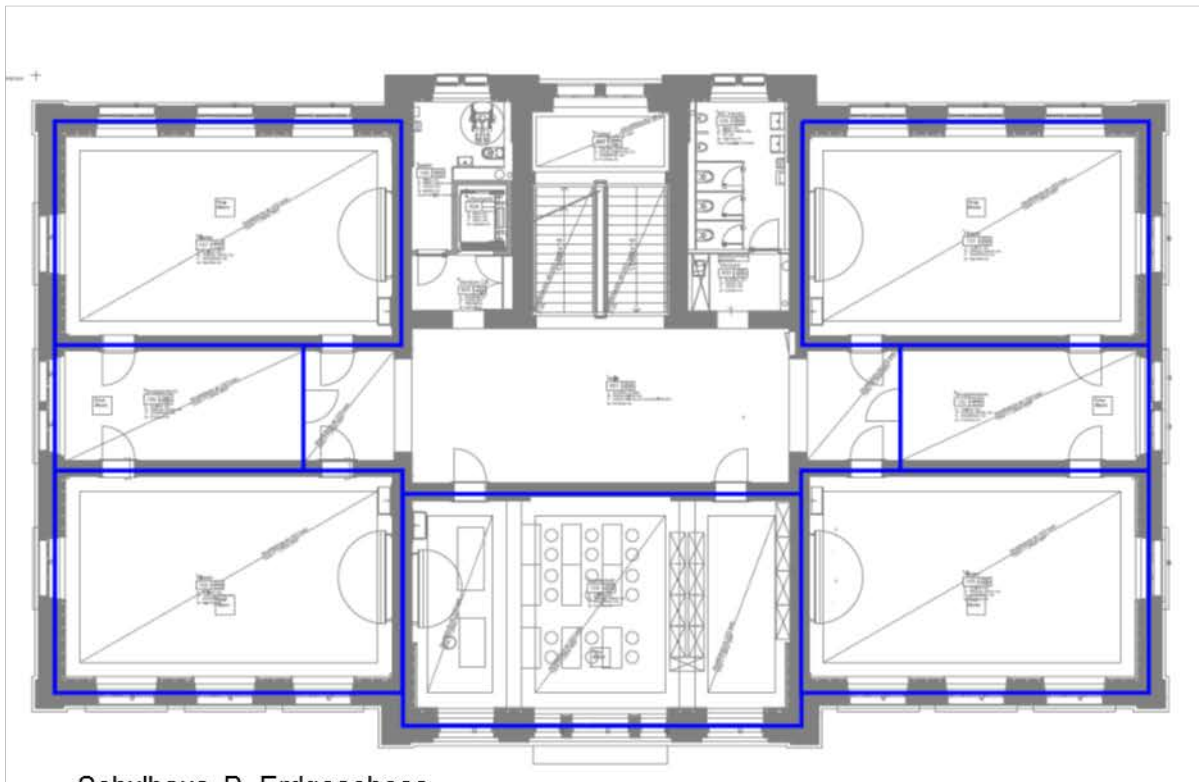


Lageplan der Schulhäuser A und B, Schnitt durch das Schulhaus Ilgen A

Anhang 2: Gebäudegrundrisse

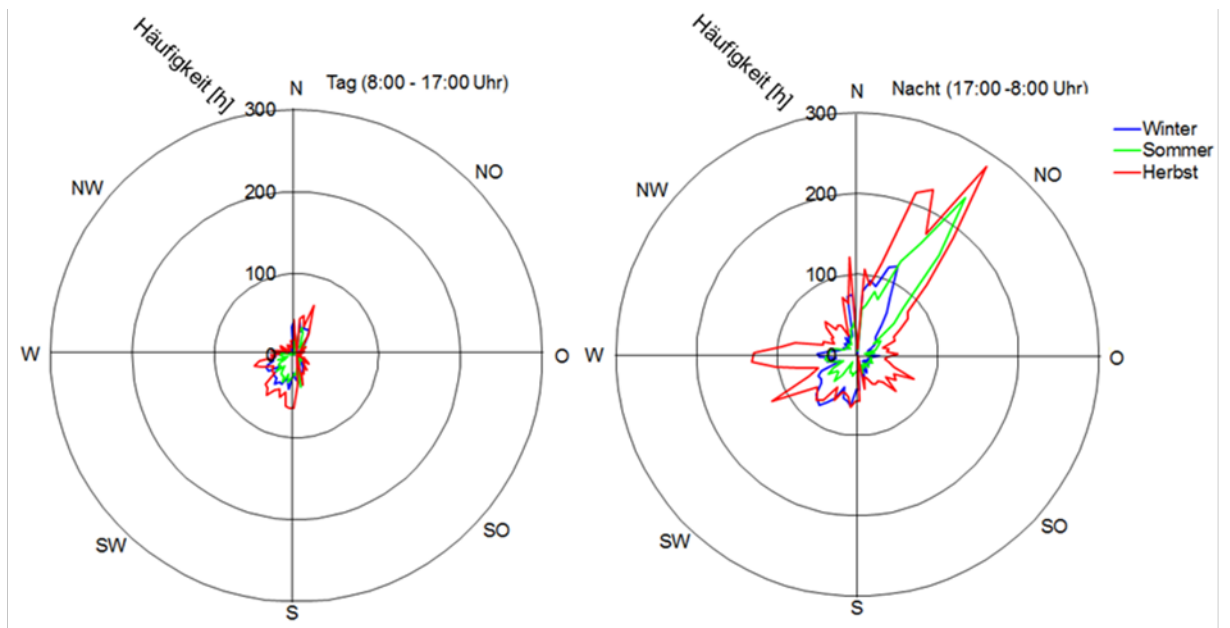


Schulhaus A, Erdgeschoss

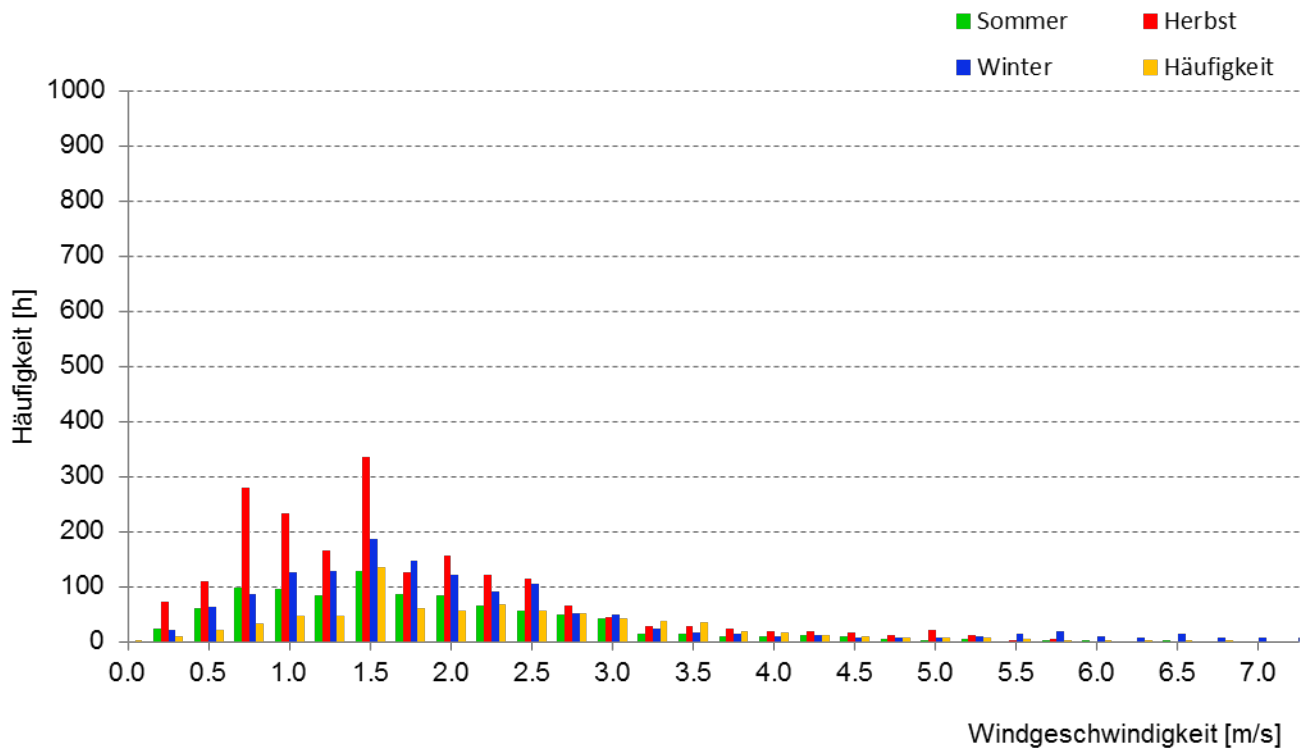


Schulhaus B, Erdgeschoss

Anhang 3: Klimatische Bedingungen am Gebäudestandort

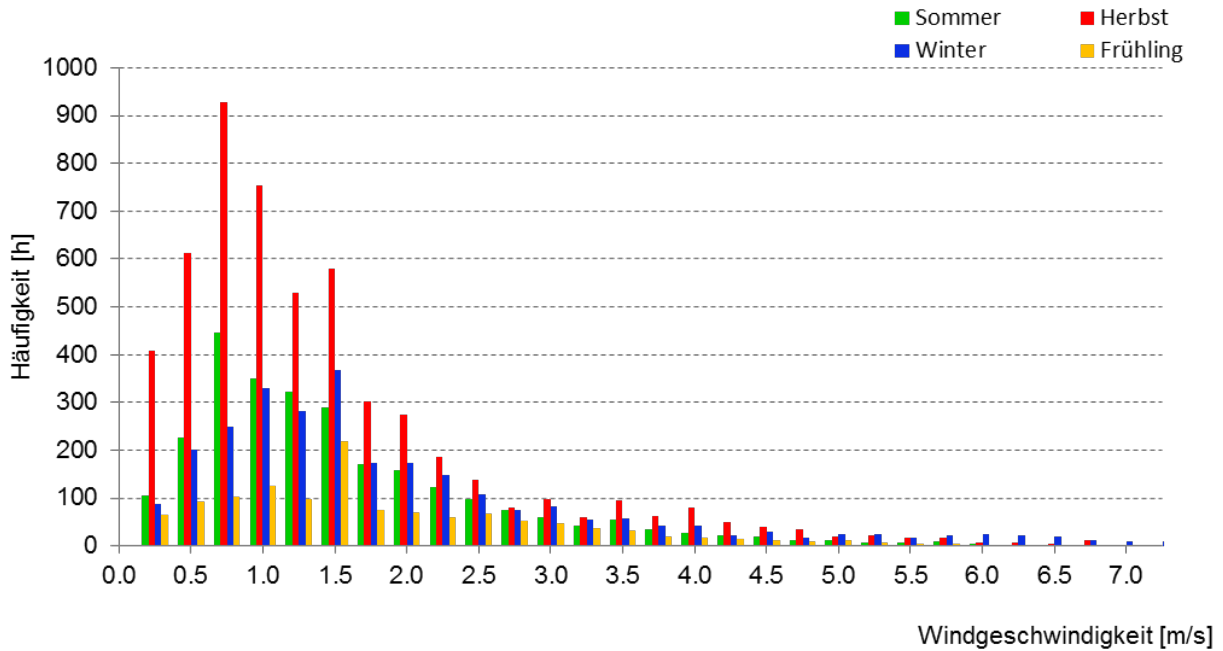


Verteilung der Windrichtungen (Tag/ Nacht sowie Sommer- Herbst und Wintersaison)

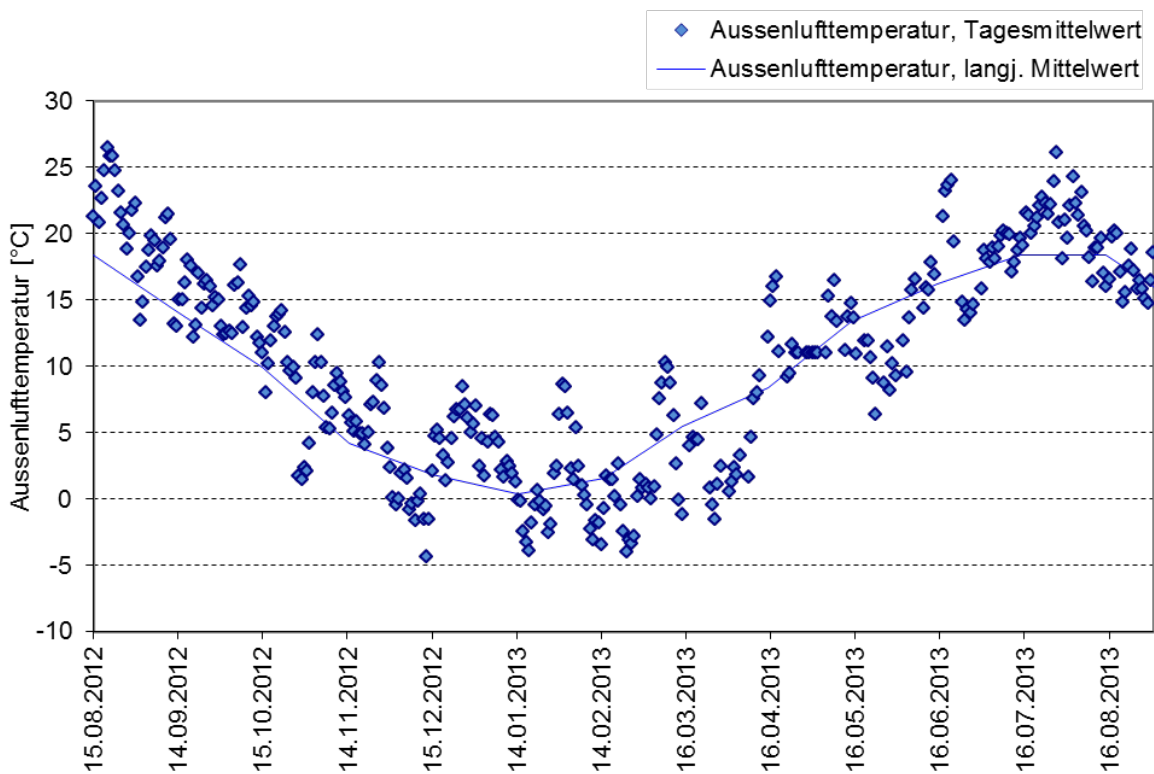


Verteilung der Windstärke (Frühlings-, Sommer- Herbst und Wintersaison) am Tag (8:00–17:00 Uhr)

Anhang 3: Klimatische Bedingungen am Gebäudestandort

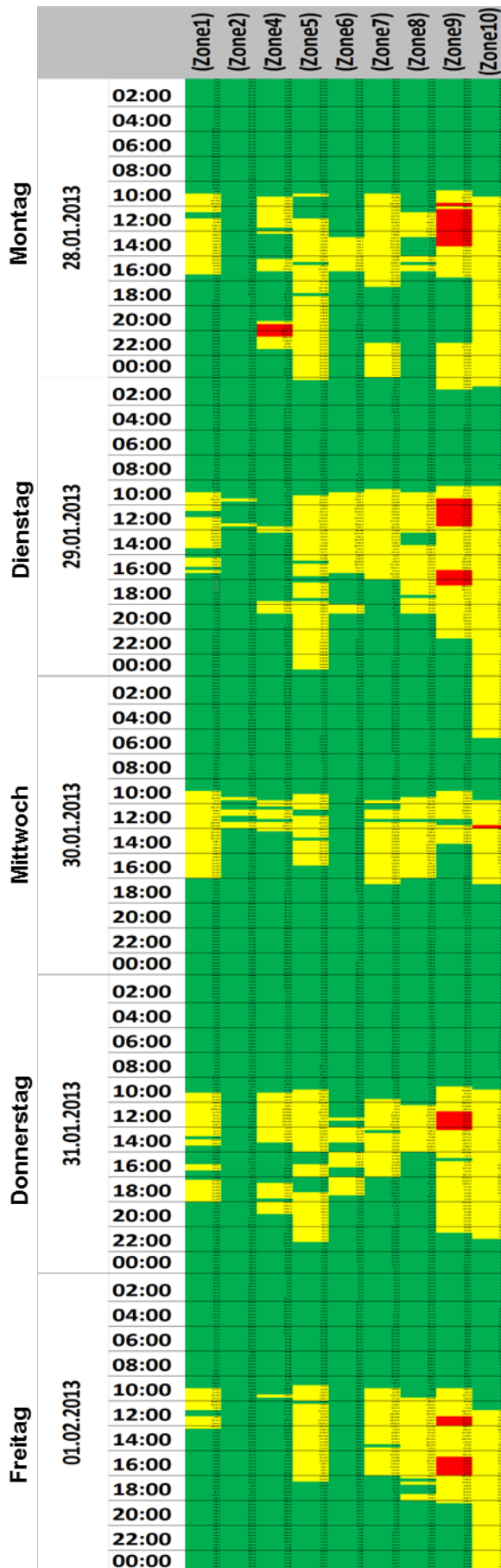


Verteilung der Windstärke (Frühlings-, Sommer- Herbst und Winter-saison) in der Nacht (17:00–8:00Uhr)



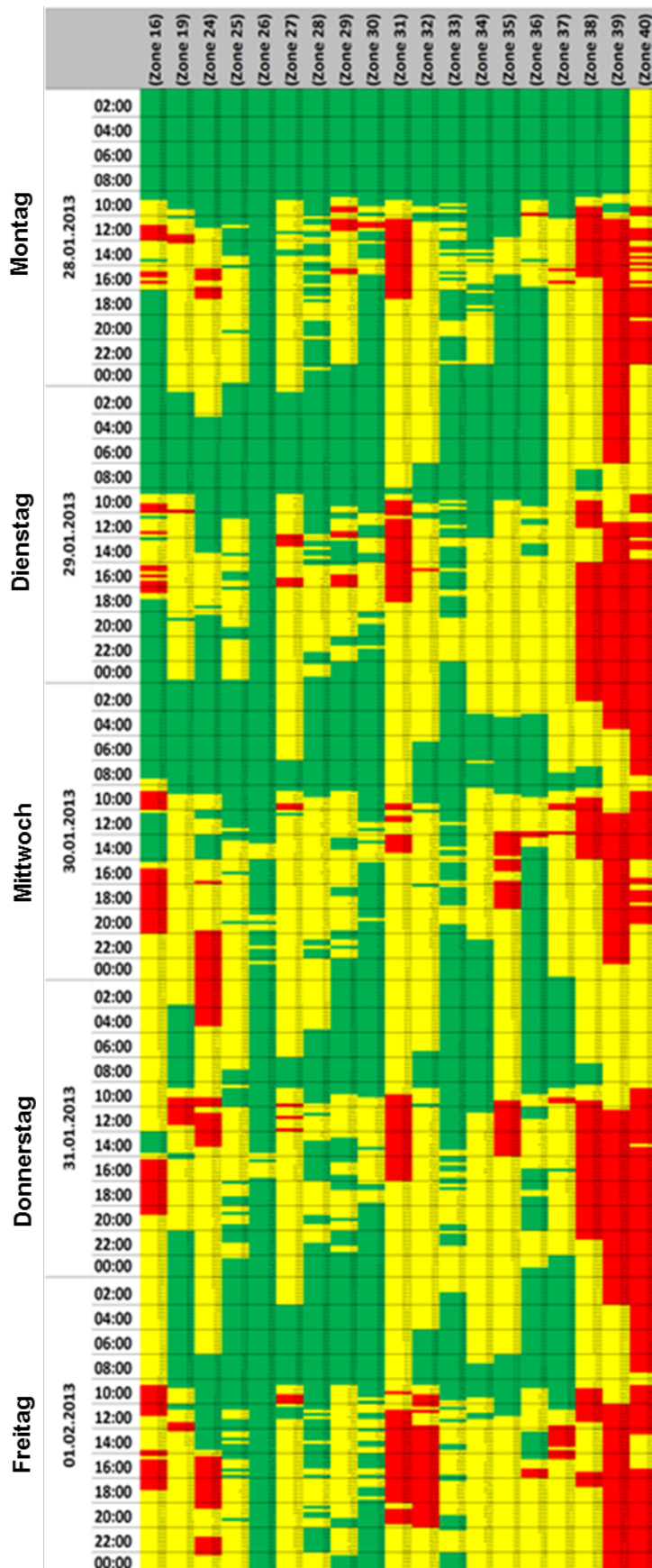
Verlauf der Aussenlufttemperaturen am Gebäudestandort, langjähriger Mittelwert (SIA 2028)

Anhang 4: schematischer Verlauf der CO2-Gehalte der Klassenräume im Schulhaus A



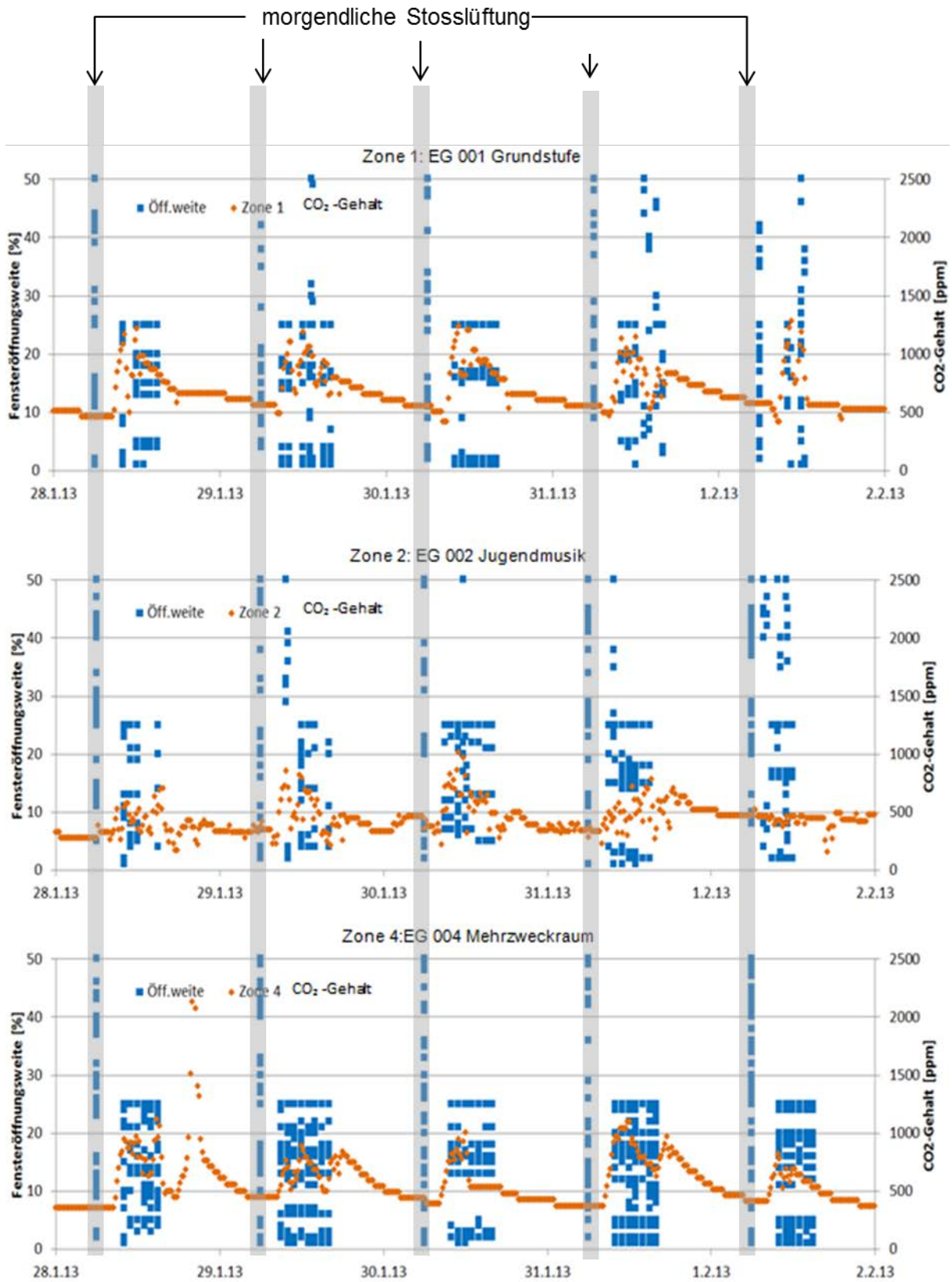
Schulhaus A		
Legende:		
Zone 1	E G 001	Grundstufe
Zone 2	EG 002	Jugendmusik
Zone 4	EG 004	Mehrzweckraum
Zone 5	1.OG 101	Grundstufe
Zone 6	1.OG 102	Handarbeit
Zone 7	1.OG 103	Grundstufe
Zone 8	2.OG 201	Grundstufe
Zone 9	2.OG 202	Gruppenraum
Zone 10	2.OG 203	Grundstufe
Farbcode:		
■ Grün	CO2 < 800 ppm	
■ Gelb	801 ppm < CO2 < 1500 ppm	
■ Rot	CO2 > 1500 ppm	

Anhang 5: schematischer Verlauf der CO2-Gehalte der Klassenräume im Schulhaus B

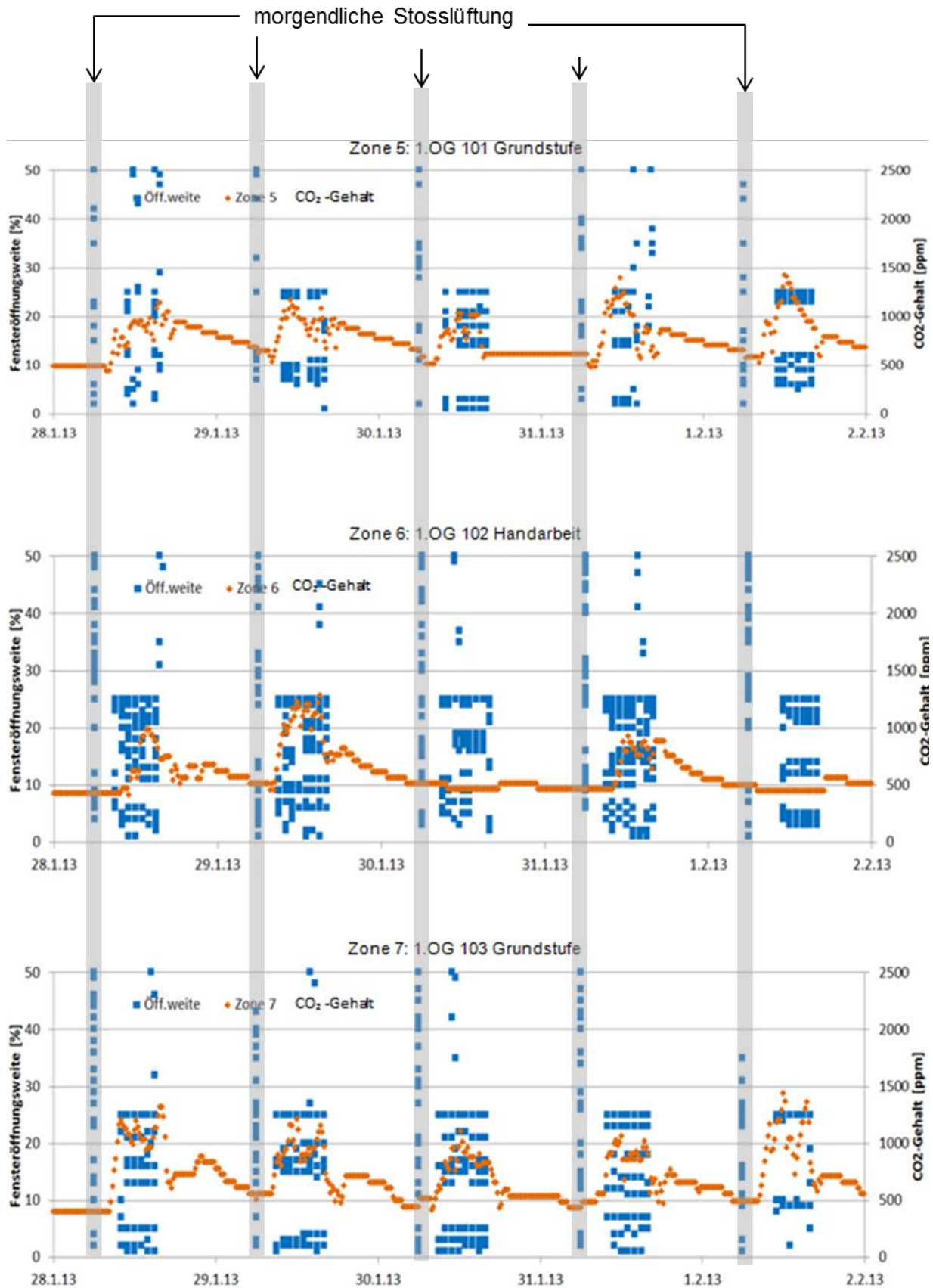


Schulhaus B		
Legende:		
Zone 16	UG 101	Kleinklasse
Zone 19	EG 001	Klassenraum
Zone 24	EG 006	Klassenraum
Zone 25:	EG 007	Vorbereitung
Zone 26:	EG 008	Teamzimmer
Zone 27	1.OG 101	Klasse
Zone 28:	1.OG 102	Gruppenraum
Zone 29	1.OG 103	Klasse
Zone 30	1.OG 104	Handarbeit
Zone 31	1.OG 105	Klasse
Zone 32	1.OG 106	Gruppenraum
Zone 33	1.OG 107	Klasse
Zone 34	2.OG 201	Klasse
Zone 35	2.OG 202	Gruppenraum
Zone 36	2.OG 203	Klasse
Zone 37	2.OG 204	Klasse
Zone 38:	2.OG 205	Klasse
Zone 39	2.OG 206	Gruppenraum
Zone 40	2.OG 207	Klasse
Farbcode:		
 	Grün: CO2 < 800 ppm	
 	Gelb: 801 ppm < CO2 < 1500 ppm	
 	Rot: CO2 > 1500 ppm	

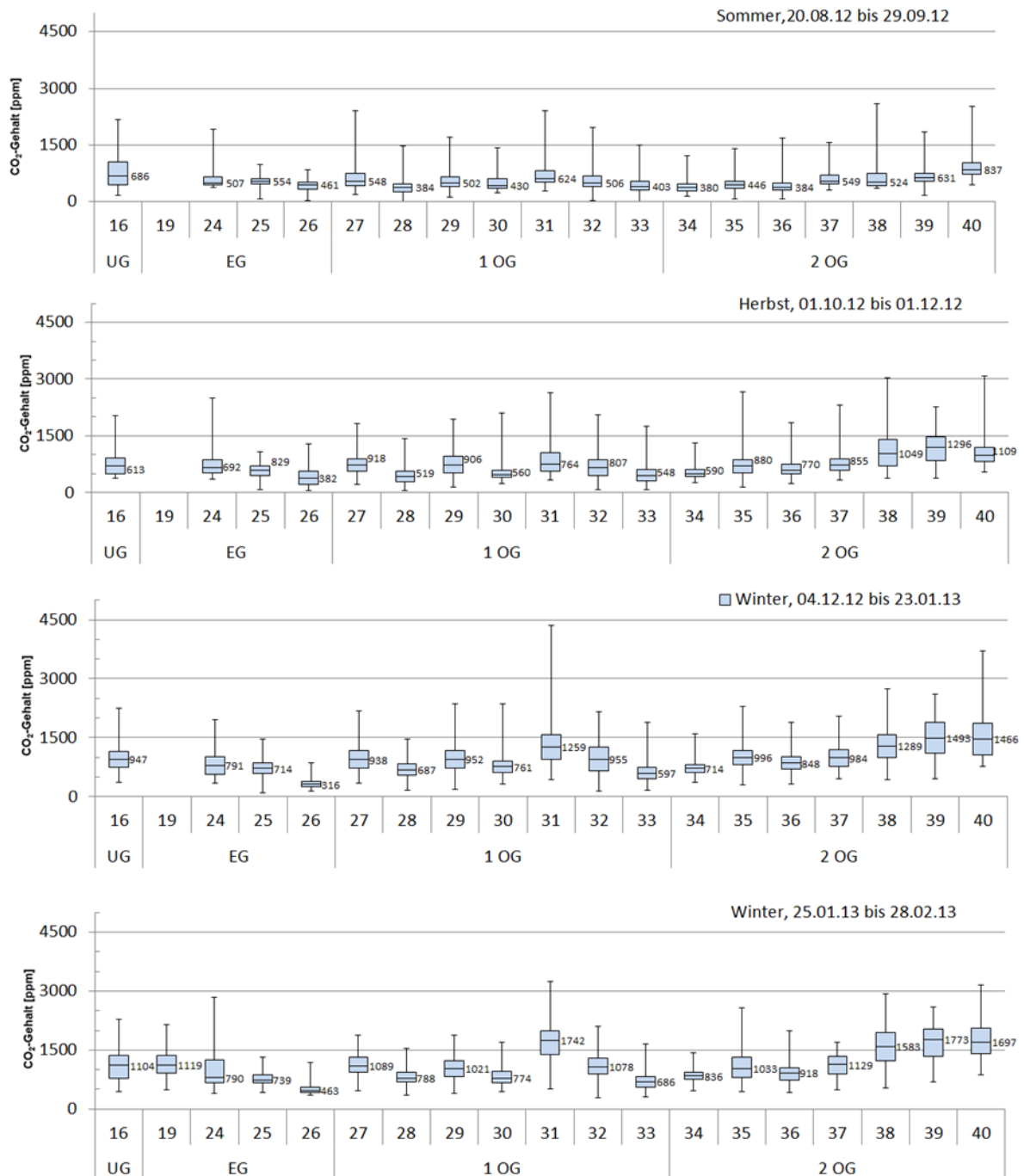
Anhang 6: Fensterverhalten während einer Kälteperiode (Räume im EG ,Schulhauses A)



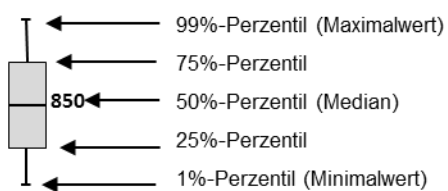
Anhang 7: Fensterverhalten während einer Kälteperiode (Räume im 1.OG ,Schulhauses A)



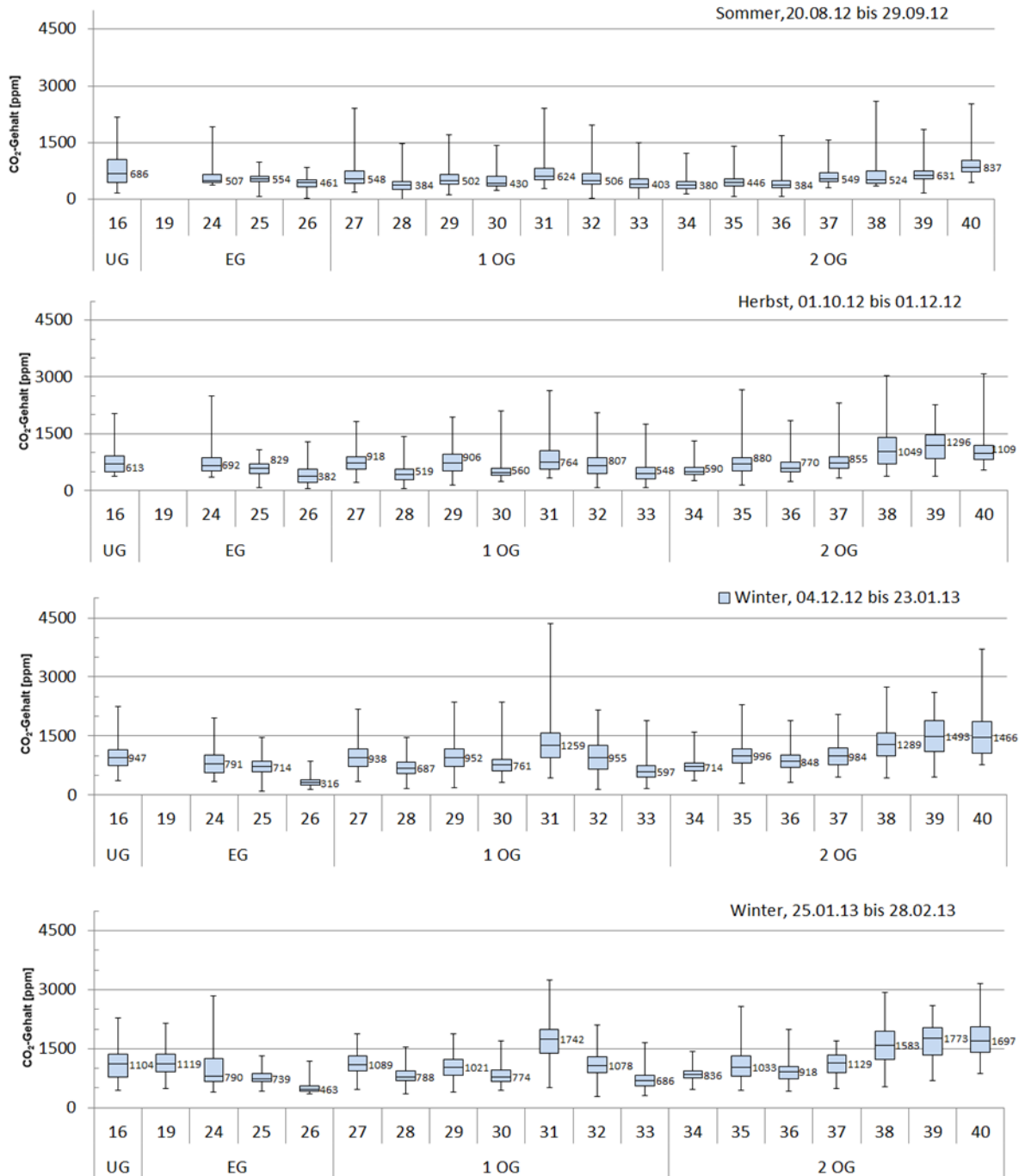
Anhang 8: Verteilung der CO₂-Raumluftgehalte , Schulhaus A (8:00 bis 17:00 Uhr)



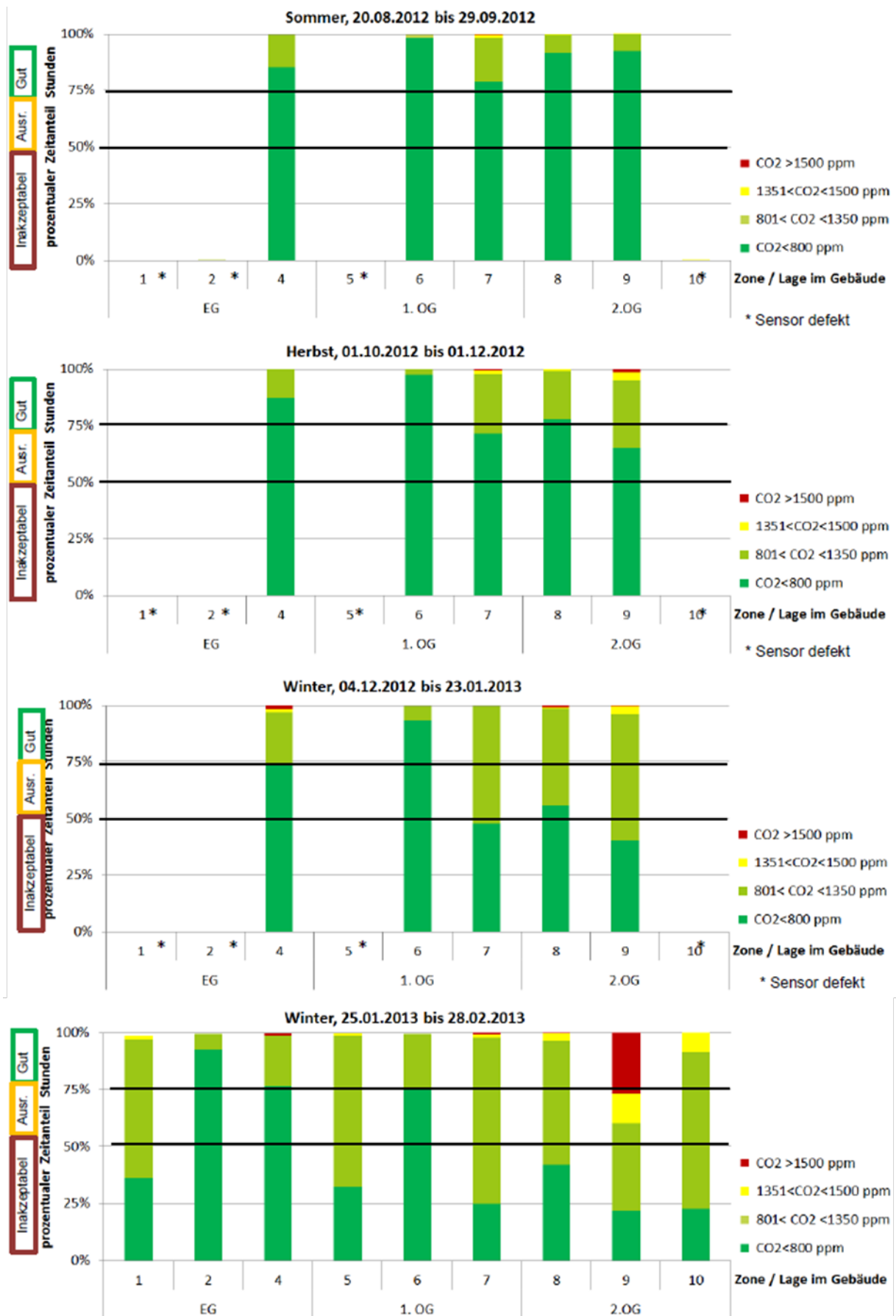
Legende: Box-Whisker-Plot



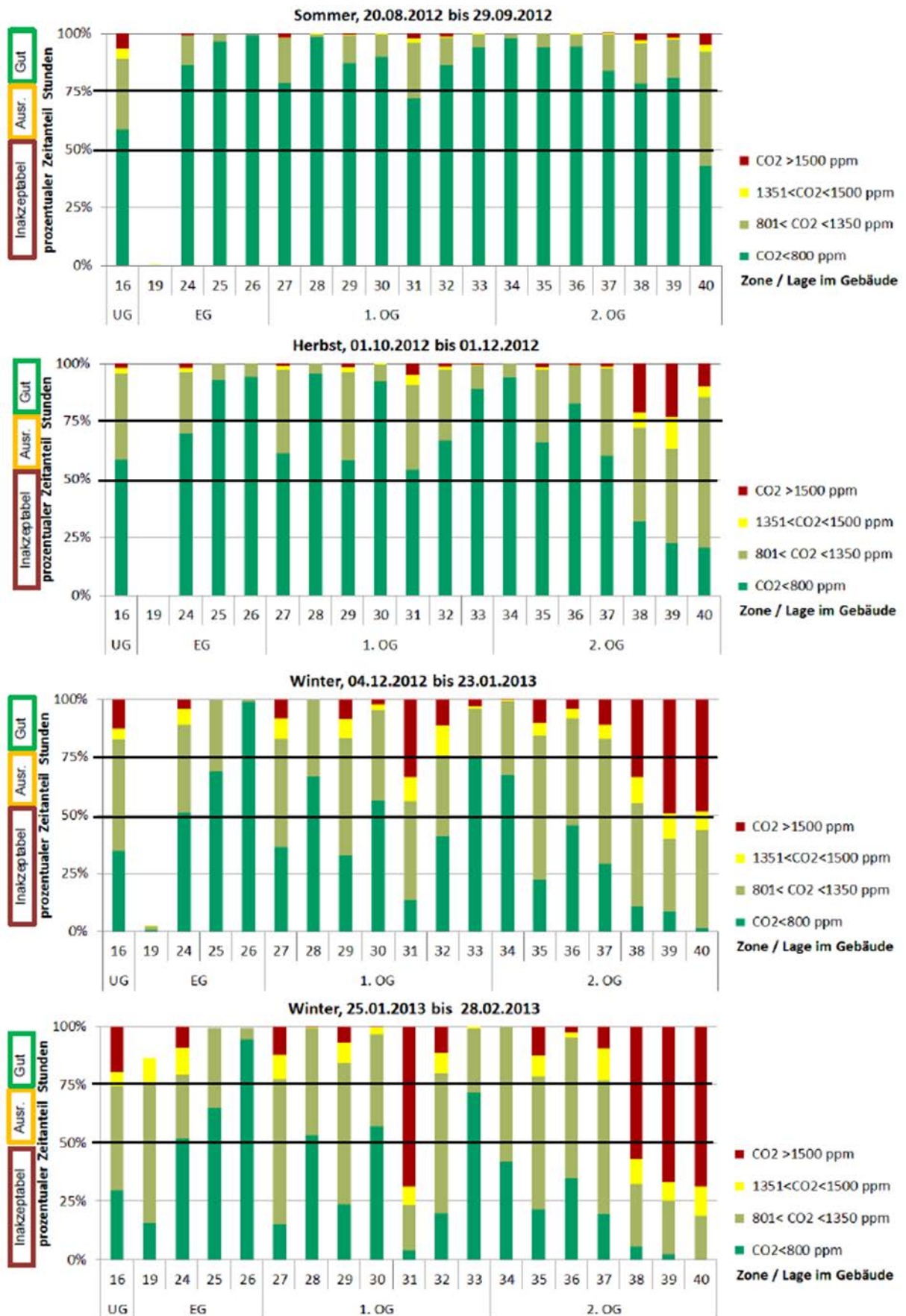
Anhang 9: Verteilung der CO₂-Raumluftgehalte , Schulhaus B (8:00 bis 17:00 Uhr)



Anhang 10: Raumluftqualität während des Unterrichts (8:00 bis 17:00 Uhr) im Schulhaus A



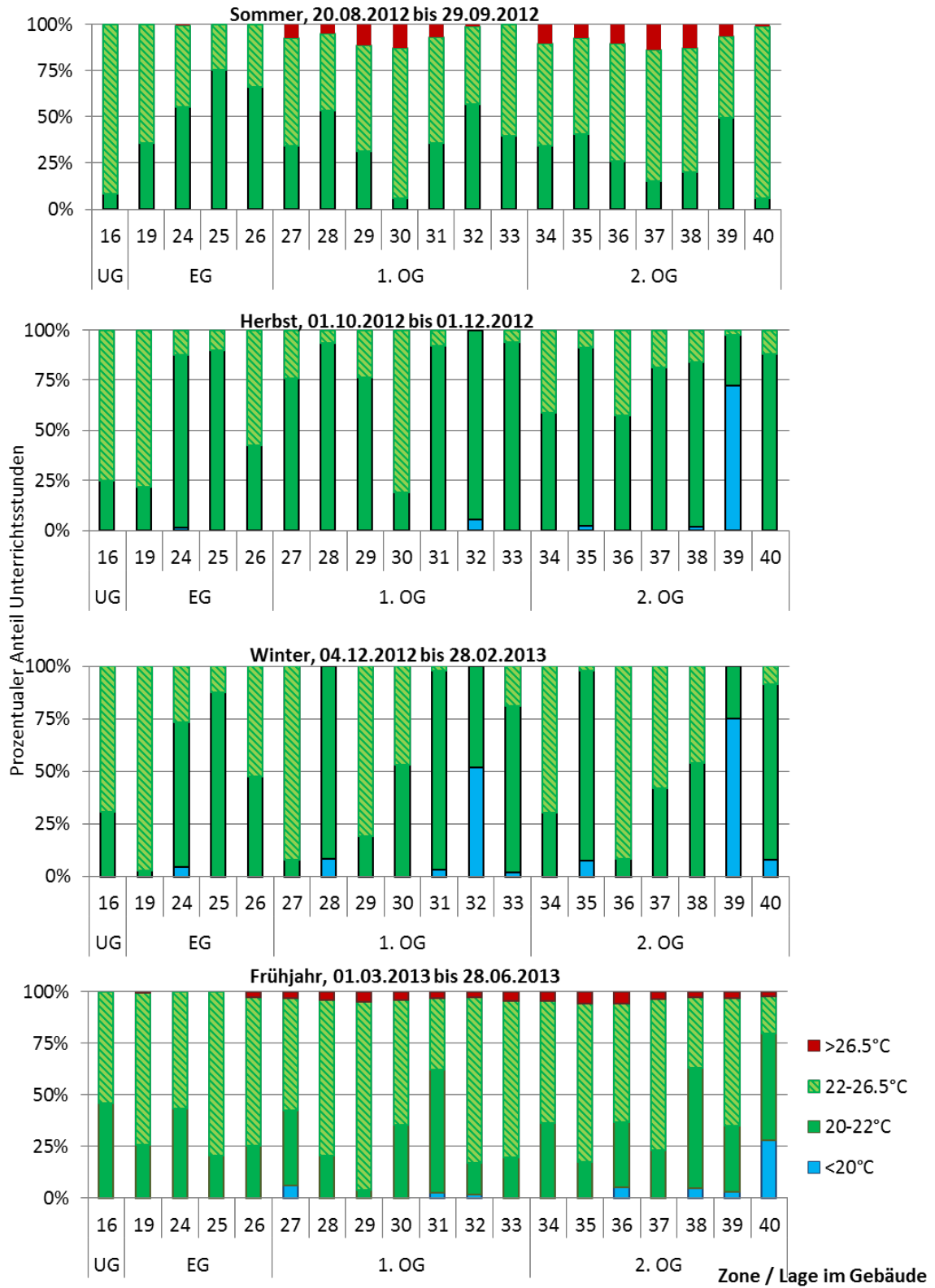
Anhang 11: Raumluftqualität während des Unterrichts (8:00 bis 17:00 Uhr) im Schulhaus B



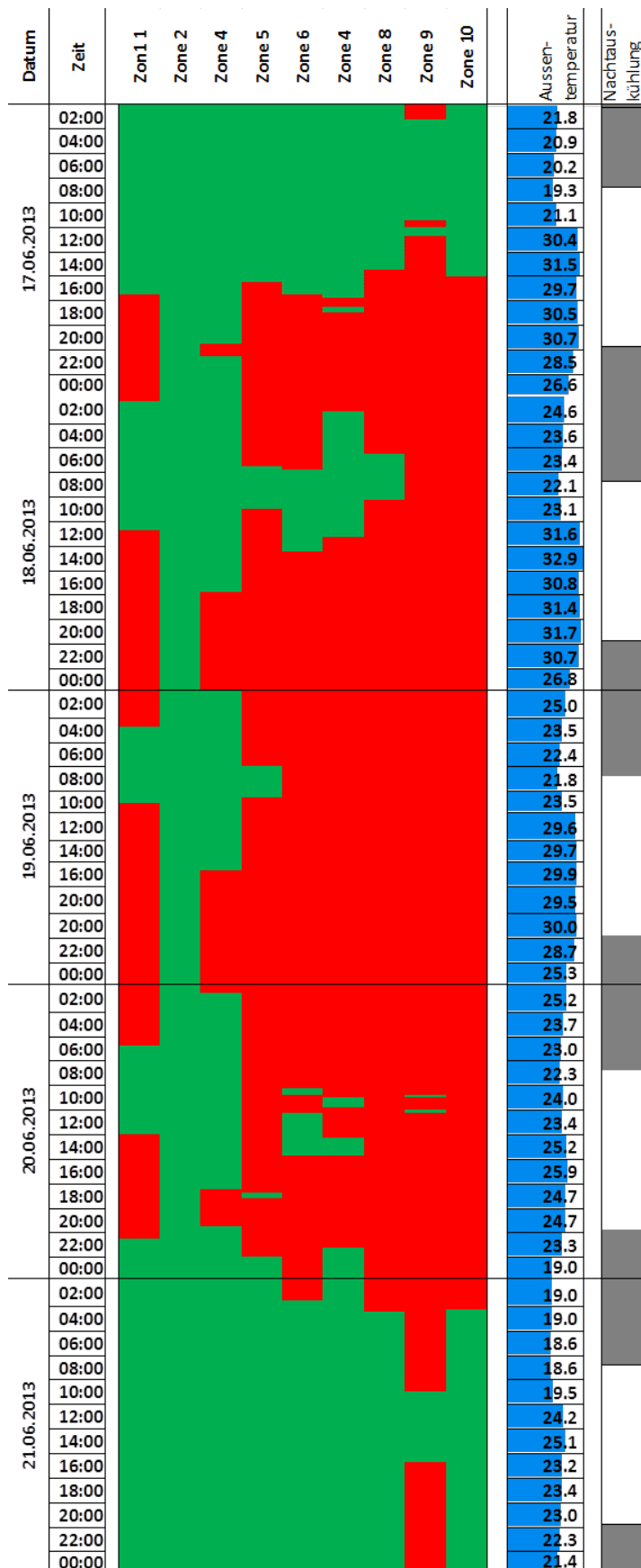
Anhang 12: Raumtemperaturen während des Unterrichts (8:00 bis 17:00 Uhr), Schulhaus A



Anhang 13: Raumtemperaturen während des Unterrichts (8:00 bis 17:00 Uhr), Schulhaus B



Anhang 14: Raumlufttemperaturen während einer Hitzeperiode, Schulhaus A



Schulhaus A

Legende:

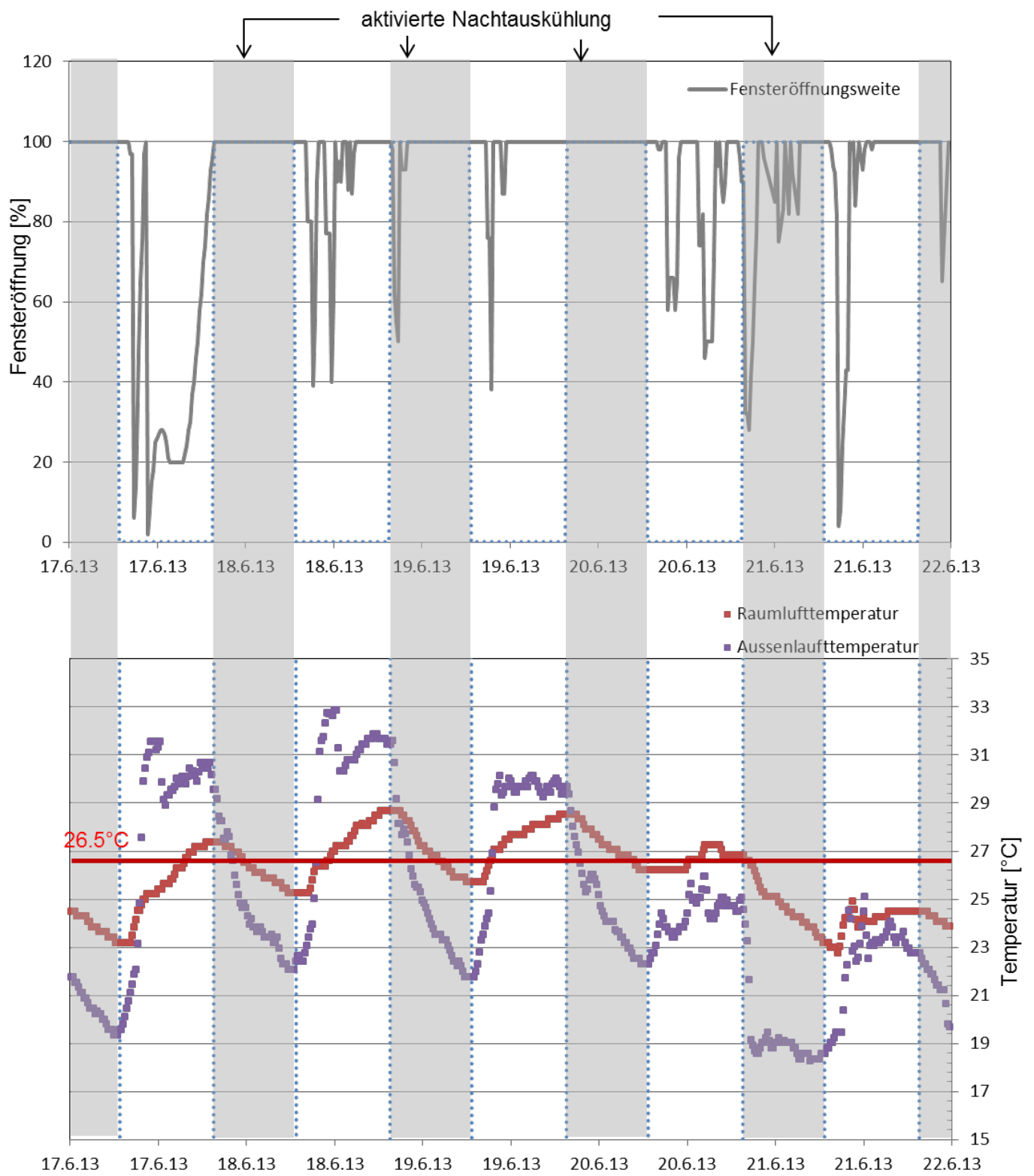
Zone 1	EG 001	Grundstufe
Zone 2	EG 002	Jugendmusik
Zone 4	EG 004	Mehrzweckraum
Zone 5	1.OG 101	Grundstufe
Zone 6	1.OG 102	Handarbeit
Zone 7	1.OG 103	Grundstufe
Zone 8	2.OG 201	Grundstufe
Zone 9	2.OG 202	Gruppenraum
Zone 10	2.OG 203	Grundstufe

Farbcode:




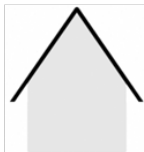



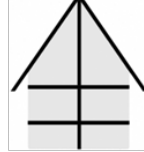










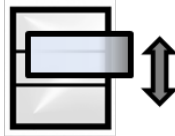



Grün: Behaglich (20 bis 26.5°C)

Rot: Zu heiss (> 26.5°C)

Anhang 16: Fensterverhalten während einer Hitzeperiode (Raum 001 EG ,Schulhauses A)



Anhang 17: Morphologischer Kasten zur Beurteilung des Gebäudes

Merkmal	Interpretationshilfen		
Lage und Aussensituation	1.1 Freistehend 	1.2 Hindernisse einseitig 	1.3 Hindernisse mehrseitig 
Hindernisse	2.1 keine 	2.2 Niedrig (<50% Gebäudehöhe) 	2.3 Hoch (>50% Gebäudehöhe) 
Fassade	Ohne vertikale oder horizontale Hindernisse (Simse, Vorsprünge, Laibungen) 	Einige vertikale oder horizontale Hindernisse 	Viele vertikale oder horizontale Hindernisse 
Grundriss	Fenster an gegenüberliegenden Fronten 	Fenster über Eck 	Fenster an einer Raumseite 
Schnitt	Hoher Raum (<3.5m) 	Niedriger Raum (>2.5m) 	
Fensterart	Mehrteilig 	Zweiteilig 	Einteilig 
Fensterflügel	Drehflügel 	Ausstell- / Übersetzfenster 	Kippflügel 
Anbauten	Innen- oder Aussenstoren 		Innen- & Aussenstoren 

Anhang 18: Morphologischer Kasten, Interpretationshilfen

Merkmal	Merkmalsausprägung		
Lage und Aussensituation	<i>Freistehend</i> Optimale Situation	<i>Hindernisse einseitig</i> Noch gut geeignet , bei ausreichendem Abstand zum Nachbargebäude akzeptabel Genauere Analyse der Anströmsituation erforderlich	<i>Hindernisse mehrseitig</i> Möglicherweise nicht geeignet
Hindernisse	<i>Keine</i> Optimale Situation	<i>Niedrig (<50% Gebäudehöhe)</i> Suboptimal , für Räume in den oberen Geschossen Ausschlusskriterium für Räume in den unteren Geschossen	<i>Hoch (>50% Gebäudehöhe)</i> Ausschlusskriterium für Räume in allen Geschossen des Gebäudes
Fassade	<i>Ohne vertikale oder horizontale Hindernisse</i> (Simse, Vorsprünge, Laibungen) Optimale Situation	<i>Einige vertikale oder horizontale Hindernisse</i> Suboptimal Analyse der Strömungssituation am einzelnen Fenster erforderlich, Ausreichender Abstand muss gewährleistet sein	<i>Viele vertikale oder horizontale Hindernisse</i> Kritisch , Einzelfallprüfung nötig, Abstand zwischen Hindernissen und zum Fenster analysieren
Grundriss	<i>Fenster an gegenüberliegenden Fronten</i> Optimale Situation	<i>Fenster über Eck</i> Noch gut geeignet Ebenfalls geeignet, es sollte geprüft werden, ob sich fest eingebaute Strömungshindernisse im Raum befinden	<i>Fenster an einer Raumseite</i> Möglicherweise nicht geeignet bei schmalen Räumen mit Fenstern an der kürzeren Raumseite, bei anderer Raumaufteilung
Schnitt	<i>Hoher Raum</i> (über 3.5m) Optimale Situation	<i>Niedriger Raum</i> (bis zu 2.5m) Suboptimal Einzelfallprüfung nötig, schlecht geeignet bei einseitiger Fensteranordnung	
Fensterart	<i>Mehrteilig</i> Optimale Situation Ein oder mehrere Flügel sollten dreh- oder klappbar sein	<i>Zweiteilig</i> Optimale Situation Ein Flügel sollte dreh- oder klappbar sein	<i>Einteilig</i> Suboptimal Absturz- und Einklemmsicherung nötig, Hineinragen in den Raum vermeiden, Fluchtwegbreite bei Gängen beachten
Fensterflügel	<i>Drehflügel</i> Geeignet , wenn eine Absturz- und Einklemmsicherung eingebaut wird, Hineinragen in den Raum vermeiden	<i>Ausstell- / Übersetzfenster</i> Geeignet , wenn eine Absturz- und Einklemmsicherung eingebaut wird, Prüfen, ob Schlagregen eindringen kann	<i>Kippflügel</i> Geeignet , wenn ein ausreichend weiter Lüftspalt gewährleistet werden kann
Anbauten	<i>Innen- oder Aussenstoren</i> Geeignet , wenn der Lüftspalt nicht verdeckt wird	<i>Innen- oder Aussenstoren</i> Ausschlusskriterium , Ausnahme: Storensteuerung ist automatisiert und mit Fenstersteuerung harmonisiert	